



Walter Alexandre
Ribeiro Pires

Antenas inteligentes em têxteis

Smart Antennas on Textiles



**Walter Alexandre
Ribeiro Pires**

Antenas inteligentes em têxteis

Smart Antennas on Textiles

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Borges de Carvalho (orientador), Professor do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Pedro Pinho (co-orientador), Professor Auxiliar do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Luis Filipe Mesquita Nero Moreira Alves
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professora Doutora Luísa Rita Brites Sanches Salvado
Professora Auxiliar da Universidade da Beira Interior (arguente)

Professor Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos / acknowledgements

Agradeço aos meus pais por todas as oportunidades que me proporcionaram ao longo da minha vida, ao meu irmão por todo o apoio prestado, aos meus amigos que estiveram sempre presentes ao longo do meu percurso académico bem como à minha namorada pelo apoio e incentivo na conclusão da dissertação, pela enorme ajuda prestada na escrita deste documento e pela sua paciência nos momentos de maior stress.

Ao meu orientador Professor Nuno Borges de Carvalho e co-orientador Professor Pedro Pinho pela orientação, conselhos e sugestões transmitidos, bem como pelo conhecimento e disponibilidade prestados ao longo da dissertação. Agradeço ainda ao engenheiro Ricardo Gonçalves pela prontidão em ajudar-me sempre que necessário, ao Paulo Gonçalves pela disponibilidade e afabilidade na construção das antenas em circuito impresso e ao Hugo Mostardinha pela ajuda prestada na hora de efetuar as medições laboratoriais fundamentais nesta dissertação.

A todos, um grande obrigado.

Palavras-Chave

RFID, têxtil, antenas, *tag* passiva, UHF.

Resumo

A tecnologia RFID tem vindo a ganhar popularidade no mercado global atual, dado que a capacidade de comunicação por ondas de rádio com praticamente qualquer objeto, a simplicidade, credibilidade e reduzido custo justificam o crescente interesse e investimento nesta tecnologia. A indústria têxtil é um setor de atividade extenso e multifacetado, que desenvolve e fabrica produtos para aplicações bastante diferenciadas, onde a aplicabilidade da tecnologia RFID pode trazer inúmeras vantagens nesta indústria, uma vez que a aposta em inovação, tanto em materiais como em tecnologias, permite a diferenciação e valorização desta indústria.

A presente dissertação propõe o desenvolvimento de três *tags* RFID: uma desenvolvida apenas em substrato FR-4, outra desenvolvida somente em substrato têxtil, e por último, uma desenvolvida conjuntamente em substrato FR-4 e têxtil. Esta última constituiu o objeto principal de estudo, onde em conjunto com as outras duas *tags*, serviram como meio de comparação em termos dos resultados obtidos por cada uma delas.

Em suma, conseguiu-se chegar a uma solução final viável, com o desenvolvimento de uma *tag* RFID capaz de ser incorporada em têxtil para fins de identificação, de dimensões $30 \times 30 \text{ mm}$ e passível de ser detetada a 3.8 metros.

Keywords

RFID, textile, antennas, passive tag, UHF.

Abstract

RFID technology has been gaining popularity in the current global market because the ability that radio waves have to communicate with nearly any object, its simplicity, credibility and low cost justifies the increasing interest and investment in this technology. The textile industry is an extensive and multifaceted activity sector that develops and manufactures products to a wide range of applications, where the applicability of RFID technology can bring numerous advantages to it, since innovation in both materials and technologies allows differentiation and appreciation to this industry.

The present dissertation proposes the development of three RFID tags: one developed only on FR-4 substrate, one merely on textile substrate and finally one developed using both substrates (textile and FR-4). This last one was the main object of study, where together with the other two tags, served as means of comparison in terms of results obtained by each of them.

In sum, a viable final solution was achieved through the development of an RFID tag capable of being incorporated onto a textile substrate for identification purposes, with dimensions of $30 \times 30 \text{ mm}$ and susceptible of being detected at 3,8 meters.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Estrutura	3
2 RFID	5
2.1 Breve História	5
2.2 Caracterização de um sistema RFID	7
2.3 Tipos de <i>tags</i> RFID	9
2.3.1 Sistemas Passivos	9
2.3.2 Sistemas Ativos	11
2.3.3 Sistemas Semi-Passivos ou Semi-Ativos	12
2.3.4 Sistemas Passivos vs. Sistemas Ativos	13
2.4 Capacidade de Armazenamento de Dados	14
2.4.1 <i>Read Only</i>	14
2.4.2 <i>Write Once Read Many</i>	14
2.4.3 <i>Read/Write</i>	14
2.5 Princípio de Funcionamento	15
2.6 Tipos de comunicação	17
2.6.1 Acoplamento indutivo	17
2.6.2 Acoplamento eletromagnético	18
2.6.3 Acoplamento por SAW	19
2.7 Frequências de operação, potências máximas e alcance	19
2.8 Protocolos	21

3	Antenas	23
3.1	Conceitos fundamentais	23
3.1.1	Diagrama de radiação	23
3.1.2	Diretividade	25
3.1.3	Eficiência de radiação	25
3.1.4	Ganho	25
3.1.5	Frequência de ressonância	26
3.1.6	Largura de banda	26
3.1.7	Impedância de entrada	27
3.1.8	Polarização	28
3.2	Tipos de antenas convencionais	29
3.2.1	Antenas filamentosas	29
	Antena <i>loop</i>	30
	Antena dipolo de meia onda	33
	Acoplamento indutivo para duas configurações de antenas distintas	35
3.2.2	Antenas de abertura	36
3.2.3	Antenas <i>microstrip</i>	37
3.2.4	Antenas refletoras	37
4	Construção das antenas RFID	39
4.1	Recursos utilizados	40
4.2	Antena <i>loop</i> (PCB)	43
4.3	Antena <i>loop</i> (PCB) acoplada com elemento parasítico (PCB)	46
4.4	Antena <i>loop</i> (PCB) acoplada com elemento parasítico (têxtil)	50
4.5	Antena <i>loop</i> (têxtil) acoplada com elemento parasítico (têxtil)	54
4.6	Comparações	58
5	Conclusões e Trabalho Futuro	61
5.1	Conclusões	61
5.2	Trabalho futuro	62
	Bibliografia	63

Lista de Figuras

Figura 1:	Evolução da Tecnologia RFID [2]	7
Figura 2:	Esquema de um sistema RFID [15]	8
Figura 3:	Esquema de funcionamento de um sistema RFID [16]	9
Figura 4:	Exemplos de <i>tags</i> passivas [17, 18, 19]	10
Figura 5:	Componentes de uma <i>tag</i> passiva [8]	10
Figura 6:	Esquema representativo de um Microchip [22]	11
Figura 7:	Exemplos de <i>tags</i> ativas [23, 24]	11
Figura 8:	Componentes de uma <i>tag</i> ativa [25]	12
Figura 9:	Componentes de uma <i>tag</i> semi-passiva [25]	12
Figura 10:	Princípio de funcionamento dos sistemas RFID [15]	15
Figura 11:	Sistema EAS [28, 29]	16
Figura 12:	Características da transmissão FDX, HDX e SEQ [15]	16
Figura 13:	Sistema RFID por acoplamento indutivo [32]	18
Figura 14:	Sistema RFID por acoplamento eletromagnético [15]	18
Figura 15:	Sistema RFID por acoplamento SAW [36]	19
Figura 16:	Frequências de operação e potências máximas em sistemas RFID [15]	20
Figura 17:	Divisão do mundo em 3 regiões geográficas pela ITU-R [15]	20
Figura 18:	Diagrama de radiação de uma antena [41]	24
Figura 19:	Diagrama de radiação isotrópico, direcional e omnidirecional [40, 42, 43]	24
Figura 20:	$ S_{11} $ em função da frequência [45]	26
Figura 21:	Modelo de uma antena em modo de recepção e transmissão [46]	27
Figura 22:	Diferentes tipos de polarização [47]	29
Figura 23:	Polarização circular direita [48]	29
Figura 24:	Diferentes configurações de antenas filamentosas [40, 49, 50, 51]	30
Figura 25:	Diferentes configurações de antenas <i>loop</i> [40, 52, 53, 54]	30
Figura 26:	Diagrama de radiação de um <i>loop</i> eletricamente pequeno [56]	31
Figura 27:	Antena <i>loop</i> quadrada com chip [57]	32
Figura 28:	Dipolo de meia-onda: distribuição da tensão e corrente ao longo deste [59]	34
Figura 29:	Diagrama de radiação de um dipolo em diferentes planos [60]	34
Figura 30:	Antena acoplada indutivamente [14]	35

Figura 31: Circuito elétrico equivalente da antena acoplada indutivamente [14]	35
Figura 32: Diferentes configurações de antenas de abertura [63, 64, 65]	37
Figura 33: Diferentes configurações de antenas <i>microstrip</i> [67, 68, 69]	37
Figura 34: Diferentes configurações de antenas refletoras [40]	38
Figura 35: Projeto da <i>tag</i> incorporada em têxtil	39
Figura 36: Kit ALIEN ALR-8800 RFID [74]	41
Figura 37: Cenário de teste	42
Figura 38: Espectro do <i>reader</i> para uma e múltiplas leituras	42
Figura 39: <i>Setup</i> da medição do alcance das antenas	43
Figura 40: Antena <i>loop</i> : simulada (a) e produzida (b)	43
Figura 41: Parâmetro $ S_{11} $	44
Figura 42: Impedância de entrada da antena: real (a) e imaginária (b)	44
Figura 43: Diagrama de radiação 3D da diretividade da antena <i>loop</i>	45
Figura 44: Diagramas de radiação 2D da diretividade da antena <i>loop</i>	45
Figura 45: Antena <i>loop</i> acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (PCB): simulada (a) e produzida (b)	46
Figura 46: $ S_{11} $ em função da frequência	47
Figura 47: Impedância de entrada da antena com condensador em série: real (a) e imaginária (b)	47
Figura 48: Diagrama de radiação 3D do ganho da antena <i>loop</i> acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (PCB)	48
Figura 49: Diagrama de radiação 2D do ganho da antena <i>loop</i> acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (PCB)	49
Figura 50: Alcance de leitura em função da potência do leitor	49
Figura 51: Constante dielétrica do substrato FR-4 em função da frequência [75]	50
Figura 52: <i>Tag</i> RFID incorporada em têxtil: simulada (a) e produzida (b)	51
Figura 53: $ S_{11} $ em função da frequência	52
Figura 54: Impedância de entrada da antena com condensador em série: real (a) e imaginária (b)	52
Figura 55: Diagrama de radiação 3D do ganho da antena <i>loop</i> com elemento parasítico em têxtil	53
Figura 56: Diagramas de radiação 2D do ganho da antena <i>loop</i> com elemento parasítico em têxtil	53
Figura 57: Alcance de leitura em função da potência emitida pelo leitor	54
Figura 58: Antena <i>loop</i> acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (têxtil): simulada (a) e produzida (b)	55
Figura 59: $ S_{11} $ em função da frequência	56
Figura 60: Impedância de entrada da antena com condensador em série: real (a) e imaginária (b)	56
Figura 61: Diagrama de radiação 3D do ganho da antena <i>loop</i> acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (têxtil)	57

Figura 62: Diagrama de radiação 2D do ganho da antena <i>loop</i> acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (têxtil)	57
Figura 63: Alcance de leitura em função da potência do leitor	58
Figura 64: Parâmetro $ S_{11} $ em função da frequência das várias <i>tags</i>	58
Figura 65: Diagrama de radiação 2D do ganho das várias <i>tags</i>	59
Figura 66: Alcance de em função da potência do leitor das várias <i>tags</i>	59

Lista de Tabelas

Tabela 1:	Principais diferenças dos sistemas RFID [8, 27]	13
Tabela 2:	Frequências de operação dos sistemas RFID [15, 27, 37]	21
Tabela 3:	Padrões ISO para a tecnologia RFID [37, 38]	22
Tabela 4:	Características do material têxtil	40
Tabela 5:	Características do material utilizado PCB	40

Lista de Acrónimos

AC	Alternating Current
CST	Computer Simulation Technology
DC	Direct Current
EAS	Electronic Article Surveillance
EPC	Electronic Product Code
FDX	Full Duplex
HDX	Half Duplex
HF	High Frequency
IC	Integrated Circuit
ID	Identification Number
IDT	Inter-Digital Transducer
IEC	International Electrotechnical Commission
IFF	Identify Friend or Foe
ISM	Industrial Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
IT	Instituto de Telecomunicações
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication Sector
LF	Low Frequency
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PCB	Printed Circuit Board
RADAR	Radio Detection and Ranging

RF	Rádio Frequência
RFID	Radio Frequency Identification
RO	Read Only
RTF	Reader Talks First
RW	Read-Write
SAW	Surface Acoustic Wave
SEQ	Sequential
SNR	Signal to Noise Ratio
SWR	Standing Wave Ratio
UHF	Ultra High Frequency
WORM	Write Once Read Many

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O progressivo desenvolvimento tecnológico conduziu a uma significativa melhoria na qualidade de vida da sociedade atual. A computação e as tecnologias, interpretadas como motores da evolução, são hoje parte integrante do nosso mundo: um mundo interativo e eletrónico. Esta é uma verdade indiscutível, pois praticamente tudo o que contactamos, compramos ou utilizamos no nosso quotidiano tem integrado um componente eletrónico em alguma fase.

Nesta perspetiva, a competitividade no mercado global torna-se cada vez mais intensa, sendo imperativo, para o sucesso e manutenção das empresas, a inovação e o investimento no âmbito tecnológico [1]. Este trabalho dá ênfase à tecnologia *Radio Frequency Identification* (RFID), vulgarmente conhecida como etiqueta inteligente, que permite a identificação e localização automática de pessoas, animais e objetos através de ondas de rádio. A capacidade de comunicação por ondas de rádio com praticamente qualquer objeto, a simplicidade, credibilidade e reduzido custo, justificam o elevado interesse e investimento nesta tecnologia [2].

A tecnologia RFID tem vindo a ganhar popularidade no cenário mundial atual por ser um instrumento capaz de gerar produtividade e vantagem competitiva às empresas. A sua utilização tem multiplicado ao longo dos últimos anos por facultar às empresas benefícios como redução de custos e de mão-de-obra, melhoria da qualidade, aumento e melhoria do controlo produtivo e eficiência dos processos, entre outros. Esta tecnologia tem sido aplicada nos mais variados setores: logística, saúde, pecuária, têxtil, automóvel, segurança entre outros [2, 3].

A indústria têxtil, setor de atividade extenso e multifacetado que desenvolve e fabrica produtos para aplicações bastante diferenciadas (têxtil-lar, vestuário, automóvel e aeronáutica), mantém-se como um dos maiores e mais importantes setores empresariais. Tem vindo a apostar fortemente na inovação em materiais e tecnologias com vista à diferenciação e valorização deste setor [4]. Constata-se nos dias de hoje um interesse no

desenvolvimento de dispositivos integrados no vestuário (têxteis inteligentes). As roupas, consideradas “a segunda pele”, são hoje encaradas como o suporte ideal para transportar dispositivos funcionais. Nelas podem ser incorporadas microcomponentes eletrônicos tais como sensores, circuitos de processamento de sinais, baterias e sistemas de transmissão de dados (RFID), que lhe conferem novas funcionalidades [5]. Realçando a tecnologia RFID, esta apresenta inúmeras vantagens da sua utilização na indústria têxtil, como identificação e rastreamento do produto (proteção da marca, inventário e stock) bem como de pessoas num espaço fechado. A roupa deixa de ser uma simples cobertura transformando-se em algo tecnológico com várias finalidades, o que evidencia o potencial quase ilimitado do uso desta tecnologia no setor têxtil [4, 5].

Este trabalho emerge com o intuito de oferecer um pequeno contributo na evolução tecnológica do setor têxtil. Pretende-se assim explorar a aplicabilidade da tecnologia RFID em têxtil, através do desenvolvimento de uma *tag* RFID apta para ser incorporada num substrato têxtil para fins de identificação. Será utilizada uma *tag Ultra High Frequency* (UHF), visto que oferece um maior alcance de leitura e maior velocidade de transferência de dados, sendo o desafio desenvolvê-la tão pequena quanto possível, salvaguardando distâncias de leitura favoráveis para a sua utilização como sistema de identificação. Para além desta, pretende-se desenvolver outras *tags*, para servirem como método de comparação, para melhor estudar a aplicabilidade da tecnologia RFID.

1.2 Motivação

“Inovação é o que distingue um líder de um seguidor”

Steve Jobs

O crescente apetite que nós, consumidores, temos por tecnologia, reflete o mundo em que vivemos: um mundo cada vez mais moderno, tecnológico e interativo. Somos cada vez mais exigentes, procurando experiências que nos surpreendam, adaptadas aos nossos gostos e necessidades. Esta é a realidade atual, que obriga as empresas a saciarem o nosso apetite através do lançamento de novos produtos e serviços inovadores.

Neste contexto, a inovação surge como algo positivo e fundamental para as empresas sobreviverem, competirem, crescerem e liderarem num mercado cada vez mais exigente. Inovar permite assim responder às expectativas e necessidades da sociedade atual, o que se traduz em liderança e respetivo sucesso empresarial. Descurar esta realidade pode-se revelar catastrófico. Exemplo disto temos a queda da outrora gigante das telecomunicações, a NOKIA, que por ter resistido à mudança, não se adaptou às rápidas transformações e exigências do setor.

A tecnologia RFID tem-se destacado no mercado mundial pelas intermináveis possibilidades de aplicação nos mais variados setores, demonstrado assim a sua enorme potencialidade. De acordo com o relatório produzido pela empresa IDTechEx [6], responsável

pela inteligência de mercado, o mercado global da tecnologia RFID registou um valor de \$8.8 mil milhões em 2013, \$9,5 mil milhões em 2014 e \$10.1 mil milhões em 2015, o que evidencia o crescimento desta tecnologia. O mercado prevê ainda um crescimento superior a um valor total de \$13.2 mil milhões em 2020.

Pelo valor que a tecnologia RFID tem provado no cenário mundial atual, considero pertinente um estudo da sua aplicabilidade e contributos no setor têxtil, uma área que tem vindo a apostar fortemente na inovação tecnológica. A tecnologia RFID apresenta um futuro promissor nesta indústria o que, aliado a medidas que sustentem o seu uso equilibrado, respeitando as questões éticas associadas, tornam a sua utilidade indiscutível.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste em desenvolver uma *tag* RFID incorporada em têxtil, para fins de identificação. Pretende-se chegar a uma solução final fiável, de reduzidas dimensões, capaz de ser utilizada como sistema de identificação. Esta *tag* será assim o elemento fulcral de estudo e análise.

Paralelamente a esta, pretende-se desenvolver outras duas *tags*, uma desenvolvida em substrato têxtil e outra em substrato FR-4 (*Printed Circuit Board* – PCB), para servirem como método de comparação em termos de distância de leitura e dimensão.

O objetivo final consiste em analisar os resultados obtidos na prática, de modo a avaliar e validar a proposta inicial, estudando-se assim a viabilidade da sua implementação.

1.4 Estrutura

A dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, estruturados da seguinte forma:

- O segundo capítulo sumaria o estado da arte da tecnologia RFID, desde a sua história, caracterização do sistema, particularidades dos seus elementos constituintes, princípios de funcionamento aos principais standards estabelecidos, visto ser fundamental um estudo detalhado e esquematizado sobre o universo da tecnologia em análise a fim de cumprir com os objetivos delineados.
- O terceiro capítulo é dedicado ao estudo detalhado de antenas. Aspectos como eficiência de radiação, impedância de entrada e ganho, entre outros, são determinantes na construção de qualquer antena. Esta abordagem é essencial, dado que se pretende projetar e construir uma *tag* incorporada em têxtil, em que estes aspetos possibilitarão o dimensionamento e adaptação da antena ao meio proposto (têxtil). São também analisados alguns tipos de antenas convencionais, com destaque para a antena *loop*, o dipolo meia onda, bem como a técnica de acoplamento indutivo que se pode utilizar para a adaptação da primeira.

- O quarto capítulo diz respeito ao projeto da *tag* RFID proposta, onde é explicado, analisado e validado todo o processo de desenvolvimento desta, desde as várias simulações à solução final encontrada.
- Por último, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões obtidas, bem como tecem-se propostas para trabalhos futuros a serem desenvolvidos neste âmbito.

Capítulo 2

RFID

A identificação por rádio frequência (RF), enquanto tecnologia de comunicação sem fios, é vista como um instrumento de envio e armazenamento de dados, através de ondas de rádio, o que possibilita uma identificação e localização automática de pessoas, animais ou objetos [7].

A capacidade de comunicar com praticamente qualquer objeto e identificação em tempo real e/ou localização a grandes distâncias, revelam que as possibilidades para a sua aplicação são ilimitadas [2, 8]. Pelo valor que tem vindo a provar no mercado global, é pertinente conhecer a sua origem e singularidades inerentes.

2.1 Breve História

A base teórica do funcionamento da tecnologia RFID data do século XIX com os contributos de Michael Faraday (1846), James Maxwell (1864), Heinrich Hertz (1887) e outros, que desenvolveram importantes estudos sobre o comportamento das ondas eletromagnéticas, que incitaram à procura da aplicabilidade das suas descobertas em comunicação por rádio [9, 10, 11].

Embora o uso generalizado da tecnologia RFID seja relativamente recente, os princípios de funcionamento desta remontam à Segunda Guerra Mundial. Amplamente explorado e desenvolvido nesta época, o *Radio Detection And Ranging* (RADAR), descoberto em 1935 por Robert Watson-Watt, é considerado a tecnologia precursora do RFID [9, 12, 13].

Todas as superpotências participantes na 2ª Guerra Mundial recorriam ao radar com o objetivo de detetar a aproximação de aviões ainda distantes e deste modo conquistar uma certa vantagem na guerra. O problema residia em identificar se esses aviões se tratavam de inimigos ou aliados, pelo que tanto os alemães como os ingleses desenvolveram uma forma de solucionar esse problema. Os alemães descobriram que se os seus pilotos girassem os aviões, 360° ao longo do eixo de simetria, aquando o regresso à base, estes modificariam o sinal de rádio refletido de volta ao radar. Este é considerado o primeiro sistema RFID

passivo, pois traduzia-se num sistema capaz de obter a identificação por via das ondas de rádio. Já os ingleses, liderados por Watson-Watt, desenvolveram um sistema de identificação denominado *Identify Friend or Foe* (IFF), que consistia em colocar um transmissor em cada avião, que transmitia sinais de resposta após receber sinais das estações de radar, identificando-o como aliado ou inimigo [10, 13].

Neste seguimento, pode-se facilmente concluir que a tecnologia RFID está de certa forma relacionada ao RADAR, dado que as *tags* passivas se assemelham aos objetos que o RADAR tenta detetar. O leitor (em inglês *reader*) emite um sinal de rádio, sendo este recebido pela *tag*, que se encontra dentro do raio de alcance, que o reflete (sistemas passivos) ou envia novo sinal (sistemas ativos).

Em 1948 Harry Stockman publica o seu trabalho, intitulado “*Communication by Means of Reflected Power*”, um dos primeiros estudos a explorar verdadeiramente o conceito de RFID. Motivado pelos avanços conseguidos na 2ª Guerra Mundial em matéria de comunicações por rádio frequência, Stockman explorou a possibilidade do uso de potência refletida (*backscattering*) como meio de comunicação [9, 11, 13].

A década de 50 caracteriza-se pela investigação teórica das técnicas de RFID com a publicação de artigos científicos sobre o tema, assim como a realização dos primeiros testes laboratoriais em dispositivos rádio. Nos anos 60, a tecnologia RFID conheceu avanços significativos graças ao começo da sua atividade comercial, que impulsionaram na década seguinte, o advento e desenvolvimento da tecnologia tal como hoje a conhecemos. De destacar a empresa *Sensormatic* e *Checkpoint* que lançou no mercado sistemas de vigilância eletrónica de artigos (EAS – *Electronic Article Surveillance*), tida como a primeira utilização massificada da tecnologia RFID. Esta técnica baseia-se em sistemas RFID de prevenção contra roubos que utilizam *tags* de 1-bit nos bens em questão, as quais são desativadas somente no ato da compra, ou caso contrário, são detetadas e o alarme despoletado (episódio de roubo) [10, 13].

Na década de 70 deu-se a explosão do desenvolvimento de sistemas RFID, potenciado pelo crescente interesse pela tecnologia RFID por parte de várias entidades. Surgiram várias aplicações para tecnologia, rastreamento de animais e veículos, assim como automação industrial, despoletando o potencial desta tecnologia [10, 11, 13].

A comercialização generalizada de sistemas RFID nas mais diversas áreas da indústria e comércio iniciou-se na década de 80, devido ao aperfeiçoamento desta tecnologia instigado pelos vários centros de investigação e desenvolvimento criados em todo o mundo. Na década de 90, começaram a surgir as primeiras normas e standards sobre RFID. Em 1999 foi criado o centro de identificação automática do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), o MIT Auto-ID Center que lançou em 2003 a primeira versão do sistema EPC (*Electronic Product Code*), um sistema criado para substituir o tradicional código de barras e aumentar a produtividade das empresas. Grandes empresas retalhistas aplicaram esta tecnologia nas suas cadeias de abastecimento, algo que tem sido adotado em larga escala por tantas outras empresas, já que esta tecnologia proporciona benefícios aliciantes às empresas, como redução de custos, aumento e melhoria do controlo produtivo, melhoria na eficiência dos processos e melhoria da qualidade dos produtos [12, 13].

Tem-se verificado um crescimento exponencial da tecnologia RFID, com aplicações nos mais variados setores, o que evidencia as múltiplas finalidades que esta tecnologia oferece. Com os investimentos colossais de grandes empresas, restam poucas dúvidas que a tecnologia RFID apresenta um futuro promissor.

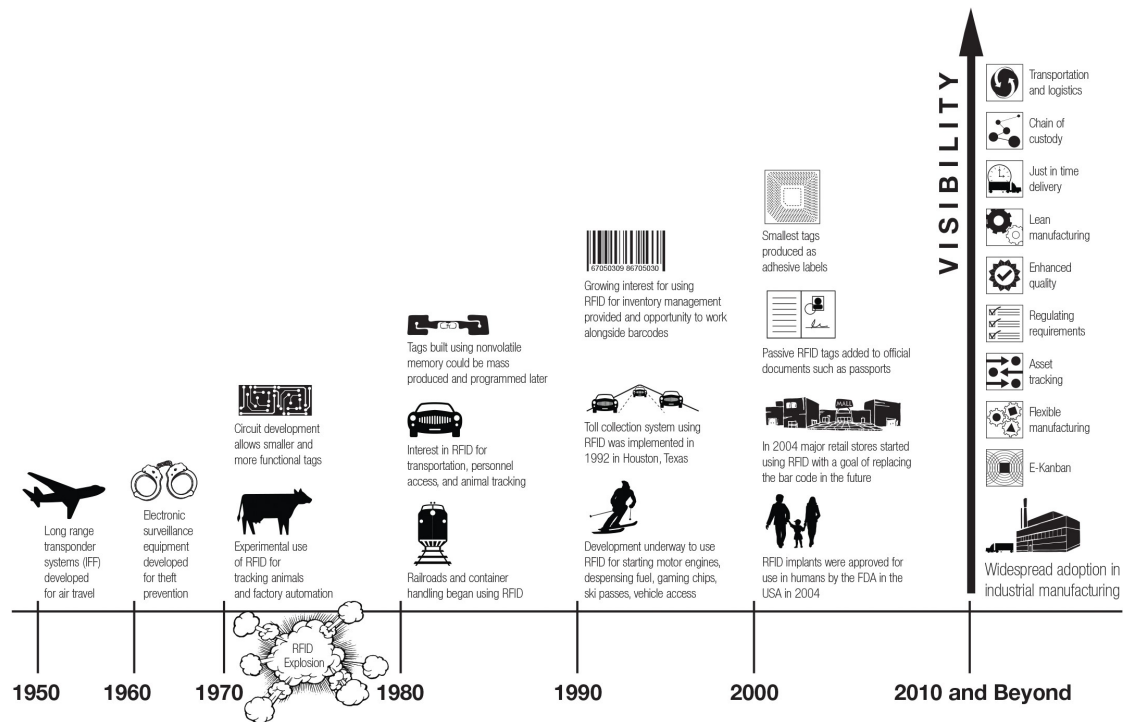


Figura 1: Evolução da Tecnologia RFID [2]

2.2 Caracterização de um sistema RFID

Um sistema RFID é composto basicamente por um ou mais leitores (em inglês *readers*) e por etiquetas (em inglês *tags* ou *transponders*). Estas, por sua vez, são constituídas por um chip de pequenas dimensões, conectado a uma antena que pode adotar múltiplas formas, dependendo do que se pretende alcançar [14, 15].

- **Reader** – utilizado para ler e armazenar a informação proveniente da *tag*;
- **Tag** – pequeno dispositivo que contém a informação a ser transmitida ao leitor;
- **Serviço de aplicação** – computador que executa a aplicação do utilizador.

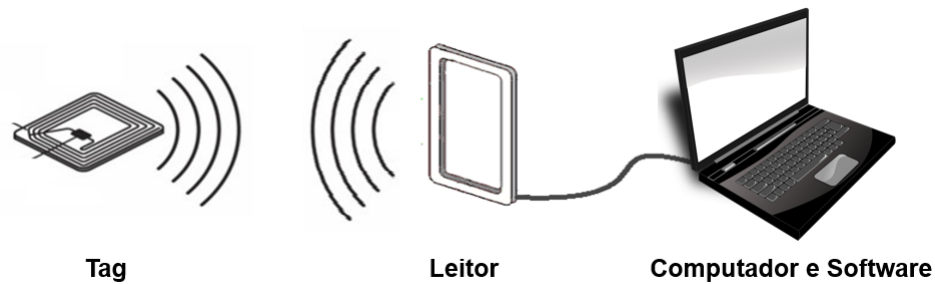


Figura 2: Esquema de um sistema RFID [15]

A *tag* RFID é um pequeno dispositivo moldável em diversas formas e dimensões, possui uma diversidade de aplicações e detém o propósito de identificar o objeto no qual está colocado. É composta por um circuito integrado (em inglês *integrated circuit* – IC) e por uma antena, que se encontra fisicamente ligada a este chip. Geralmente, o formato e dimensão da antena é aquele que determina o tamanho da *tag*, pois é o seu maior componente.

O IC, um circuito semicondutor geralmente concebido por um fabricante de chips em silício, revela-se um constituinte fundamental da *tag*, operando da mesma forma que um microprocessador, mas num modo mais simplificado que este. O seu objetivo principal consiste em transmitir o seu identificador único quando este é ativado [14, 15].

Facilmente se constata que a *tag* é o dispositivo mais simples do sistema e o *reader* a entidade de maior complexidade, sendo este o elemento principal do sistema, pois é responsável não só pela leitura da informação contida na *tag*, como pela comunicação com agentes exteriores de processamento de dados, bem como pela gestão do sistema. Tem igualmente a seu cargo, a coordenação de acesso múltiplo (um *reader* pode detetar várias *tags*), correção de erros, rejeição da repetição de dados, mecanismos de segurança, gestão e controlo. Devido ao leque de funcionalidades que o *reader* apresenta, não é de estranhar que se trate do componente de maiores dimensões, sofisticação e custo mais elevado [9, 14, 15].

Relativamente ao modo de funcionamento de um sistema RFID, o *reader* envia uma onda RF para a *tag*, ativando-a. Esta por sua vez responde com o seu identificador (em inglês *Identification number* – ID) de volta ao *reader*, o qual fornece os dados recebidos ao serviço de aplicação, que os trata consoante o pretendido para o sistema implementado. A figura seguinte representa o modo de funcionamento geral dos sistemas RFID.

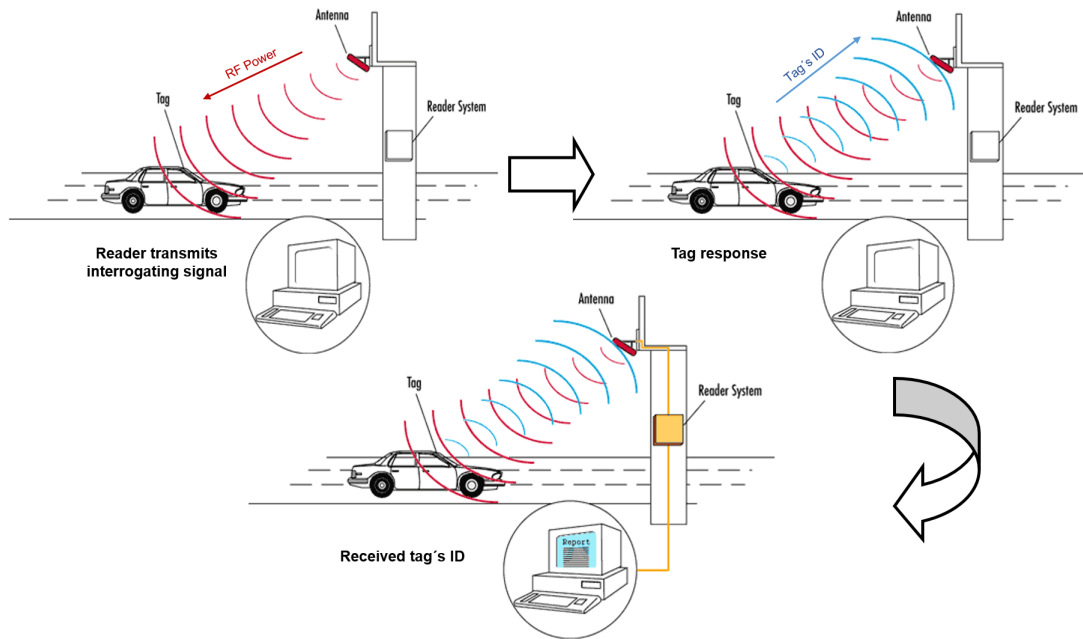


Figura 3: Esquema de funcionamento de um sistema RFID [16]

2.3 Tipos de *tags* RFID

As *tags* podem ser categorizadas em três classes (sistemas passivos, sistemas ativos e sistemas semi-passivos), consoante a presença, ou ausência, de uma fonte de energia interna para o funcionamento e transmissão do sinal de rádio [14].

2.3.1 Sistemas Passivos

Os sistemas passivos são caracterizados pela ausência de transmissor de rádio e de bateria interna para o seu funcionamento. A *tag* passiva aproveita-se da energia que é enviada pelo *reader*, aquando de uma leitura, para ativar os seus circuitos através de ondas de rádio, tornando-se assim operacional e capaz de transmitir os dados armazenados [9, 14, 15]. Estes sistemas recorrem à técnica de *backscattering* para alimentar o seu IC e transmitir os seus dados de volta para o *reader*. Isto significa que a energia que é radiada pela antena do *reader* é muito importante para determinar qual a sua zona de operação [14].

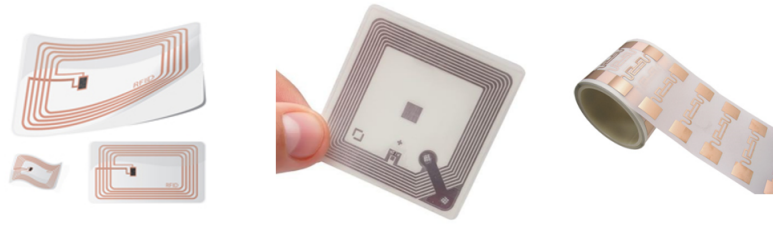


Figura 4: Exemplos de *tags* passivas [17, 18, 19]

Um sistema passivo é necessariamente do tipo *Reader Talks First* (RTF), ou seja, o *reader* terá sempre de comunicar primeiramente, dado que a *tag* necessita da energia proveniente deste para alimentar o seu IC. Neste sentido, o *reader* terá que estar constantemente a enviar sinais de rádio, de modo a que qualquer *tag* que entre no seu raio de alcance consiga ser ativada e transmitir os seus dados de volta para este [20].

Os principais elementos que integram as *tags* passivas são a antena e o microchip.

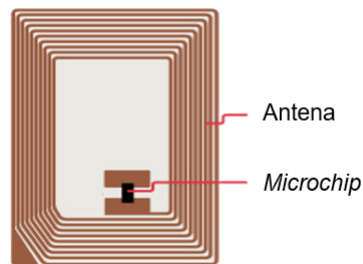


Figura 5: Componentes de uma *tag* passiva [8]

A antena, fisicamente ligada ao microchip, pode adotar diversos formatos consoante a aplicação, espaço disponível, frequência de operação e alcance máximo pretendido. Este é o componente de maior dimensão e respetivamente aquele que determina o tamanho da *tag* [14]. O microchip engloba, necessariamente, um retificador de potência, que converte o sinal RF, sinal corrente alternada (em inglês *alternating current* – AC), em potência corrente direta (em inglês *direct current* – DC), potência essa que irá garantir o funcionamento da *tag*.

Este pode ser complementado com um extrator de relógio com propósitos de sincronismo, um modulador que modula a onda recebida pelo *reader*, uma unidade lógica responsável pela implementação do protocolo de comunicação entre o *tag* e o *reader*, e uma memória interna para armazenamento de dados [21].

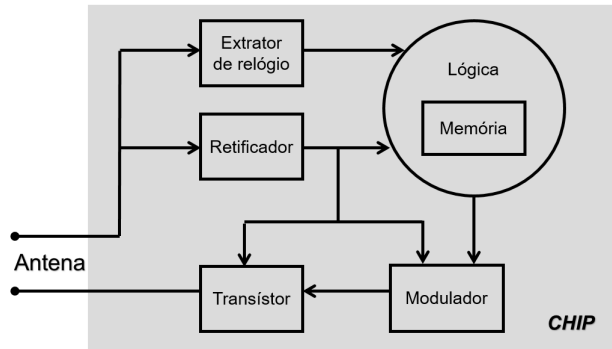


Figura 6: Esquema representativo de um Microchip [22]

As *tags* passivas são aquelas que mais se têm desenvolvido no cenário atual, devido ao seu reduzido custo, dimensões e simplicidade de utilização. Não requerem manutenção e ostentam uma longa durabilidade, contudo apresentam como limitação o alcance, comparativamente com outros tipos de *tags*.

2.3.2 Sistemas Ativos

Os sistemas ativos são caracterizados pela presença de uma bateria ou fonte de energia e de um transmissor RF independentes. A bateria vai alimentar tanto o chip como o transmissor RF, resultando num aumento do alcance de leitura, dado que a sensibilidade do sistema deixa de ser restrita. Obtêm-se valores mais baixos de sensibilidade pelo simples facto de o sistema ser alimentado por uma fonte externa ao *reader*. Torna-se desnecessária a energia emitida pelo *reader*, sendo transmitida na mesma a informação armazenada na *tag* graças a este sistema. Facilmente se conclui que, as *tags* ativas têm um maior alcance e capacidade de armazenamento que as *tags* passivas, contudo, necessitam de manutenção periódica, não suportam condições tão extremas como as *tags* passivas e são geralmente de maiores dimensões que estas [9, 14].



Figura 7: Exemplos de *tags* ativas [23, 24]

A figura 7 ilustra, no lado direito, um exemplo de *tag* ativa complementada com um sensor externo de monitorização de temperatura. Este tipo de *tag* por ser energeticamente independente do *reader*, pode ser utilizada como sensor de monitorização de

um determinado parâmetro. Periodicamente, ou sempre que o *reader* se encontrasse no alcance da *tag*, é possível a transferência de dados do sensor para o *reader* [9].

As *tags* ativas são constituídas por uma antena, microchip, alimentação interna e eletrônica adicional.

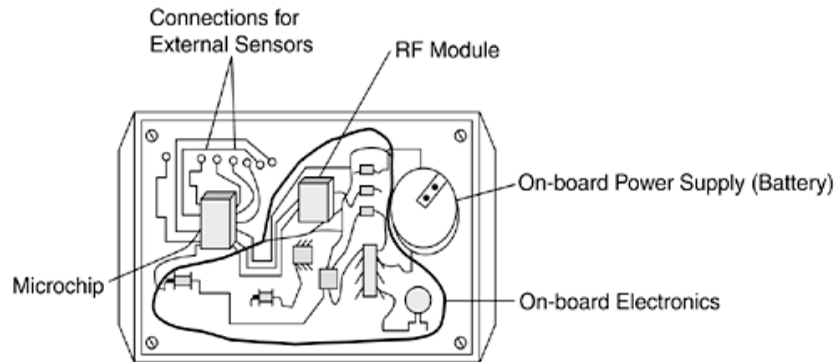


Figura 8: Componentes de uma *tag* ativa [25]

2.3.3 Sistemas Semi-Passivos ou Semi-Ativos

Os sistemas semi-passivos/semi-ativos apresentam-se como sistemas intermédios, conciliando as vantagens e desvantagens dos sistemas anteriormente referidos, com o intuito de se obter “o melhor dos dois mundos”. Similarmente aos sistemas ativos, possuem uma bateria externa para alimentar o seu circuito interno, contudo não detêm de um módulo RF, recorrendo à técnica de *backscattering* para comunicarem com o leitor, tal como os sistemas passivos [9].

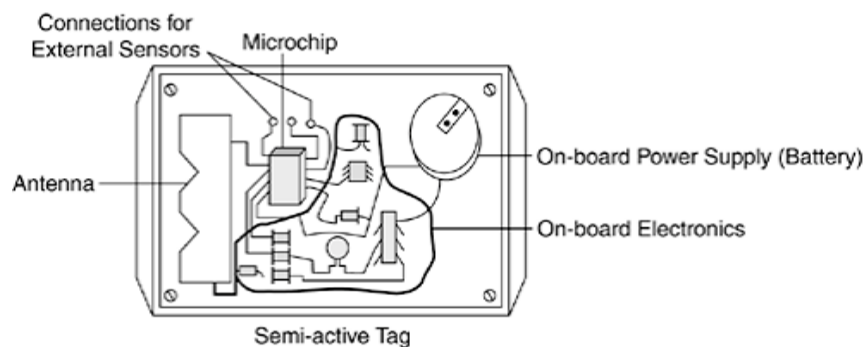


Figura 9: Componentes de uma *tag* semi-passiva [25]

O alcance de leitura deste tipo de sistemas é ligeiramente maior que as *tags* passivas, mas ainda inferior comparativamente às *tags* ativas, pelo facto de não utilizarem a sua energia interna no reenvio do sinal [8, 26].

Os sistemas semi-passivos/semi-ativos representam um compromisso entre os sistemas passivo e ativo: apresentam uma maior velocidade de processamento e capacidade de memória que as *tags* passivas, mas ainda inferior às *tags* ativas; e ostentam maior longevidade e menor necessidade de manutenção face às *tags* ativas [21].

2.3.4 Sistemas Passivos vs. Sistemas Ativos

A tabela seguinte referencia as principais diferenças entre os sistemas passivos e os sistemas ativos, para uma melhor análise das suas características.

Tabela 1: Principais diferenças dos sistemas RFID [8, 27]

Tipo de Tags	Características Gerais	
Passiva	Bateria	Não tem fonte de alimentação
	Tag Power	RTF, ativada só quando o leitor envia um sinal com energia
	Alcance	Pequeno (10m)
	Longevidade	Longa vida de funcionamento
	Manutenção	Não requerem manutenção
Semi-passiva	Bateria	Tem uma fonte de alimentação que usa apenas para alimentar os circuitos internos
	Tag Power	Em geral, não é ativada pelo leitor, mas pode acontecer
Ativa	Bateria	Tem uma fonte de alimentação que é utilizada tanto nos circuitos internos como na transmissão da informação
	Tag Power	Contínuo. Podem funcionar mesmo sem a presença de um leitor (ex: monitorização de certos parâmetros)
	Alcance	Grande (100m)
	Longevidade	Não suportam condições tão extremas como os passivos
	Manutenção	Necessitam de manutenção periódica

Memória,
Velocidade,
nº tags em
repouso,
alcance,
custo

-

+

Facilmente se conclui que os sistemas ativos são aqueles que ostentam melhores características em termos de velocidade de processamento, capacidade de armazenamento e alcance de leitura. Todavia são sistemas mais dispendiosos, o que não desperta a atenção dos mercados. Já as *tags* passivas, apesar das suas limitações, têm uma maior taxa de aplicabilidade, podendo ser utilizadas para diversos fins, o que associado ao seu baixo custo, justifica o seu elevado interesse e desenvolvimento no cenário mundial atual.

2.4 Capacidade de Armazenamento de Dados

As *tags* podem ser subdivididas, consoante o tipo de memória utilizado, em três grupos: *Read Only* (RO), *Write Once Read Many* (WORM) e *Read/Write* (RW) [27].

2.4.1 *Read Only*

As *tags* RO permitem apenas a leitura de dados da sua memória. Geralmente, são programadas uma única vez, aquando da sua produção em fábrica, com uma identificação única (número de série, por exemplo o EPC), não sendo depois possível realizar qualquer tipo de escrita ou eliminação de dados da sua memória. Neste sentido, a sua gravação é permanente, não sendo possível qualquer tipo de atualização de dados [27].

Pelas características que apresentam, este tipo de *tags* revelam-se inviáveis para sistemas que necessitem de constantes atualizações de dados, como nos casos de monitorização de certos parâmetros (ex.: sensor de distância, temperatura). Neste contexto, é apenas aconselhável o seu uso em pequenas aplicações comerciais e para fins de localização, tal como se observa em lojas de roupa ou até mesmo bibliotecas. Nestes locais, cada *tag* (item) possui um código de identificação único, existindo uma base de dados que o associa com um determinado detalhe específico do produto: nome, custo, entre outros [21].

Nesta subcategoria encontram-se inseridas a maior parte das *tags* passivas.

2.4.2 *Write Once Read Many*

As *tags* WORM são semelhantes às RO, mas com uma ligeira diferença, no que diz respeito à possibilidade de serem programadas uma única vez pelo cliente para uma determinada finalidade. Todavia na prática, existem alguns tipos de *tags* WORM que concedem a sua reprogramação, contudo num número limitado de vezes, dado que este ato pode danificar permanentemente a memória, tornando-a inutilizada [21, 22].

2.4.3 *Read/Write*

As *tags* RW permitem tanto a leitura como a escrita, podendo ser reprogramadas inúmeras vezes. Neste contexto, autorizam atualizações constantes dos dados da memória e podem ser utilizadas nas mais diversas aplicações, com destaque para monitorização de parâmetros ou do percurso de um produto, com o intuito de conhecer se este chegou ao destino nas melhores condições possíveis [26]. Este tipo de *tags* é o mais indicado para segurança de dados, monitorização de ambientes e processos que necessitem de uma contínua atualização de dados [8].

Pelas características que ostentam não é de admirar que este tipo de *tags* apresentem um custo acrescido, comparativamente aos tipos anteriormente referidos [22].

2.5 Princípio de Funcionamento

Os sistemas RFID podem ser agrupados em dois grandes grupos (1-Bit *Transponder* e n-Bit) consoante a transmissão de dados e energia entre o *reader* e a *tag* num determinado espaço de tempo [15].

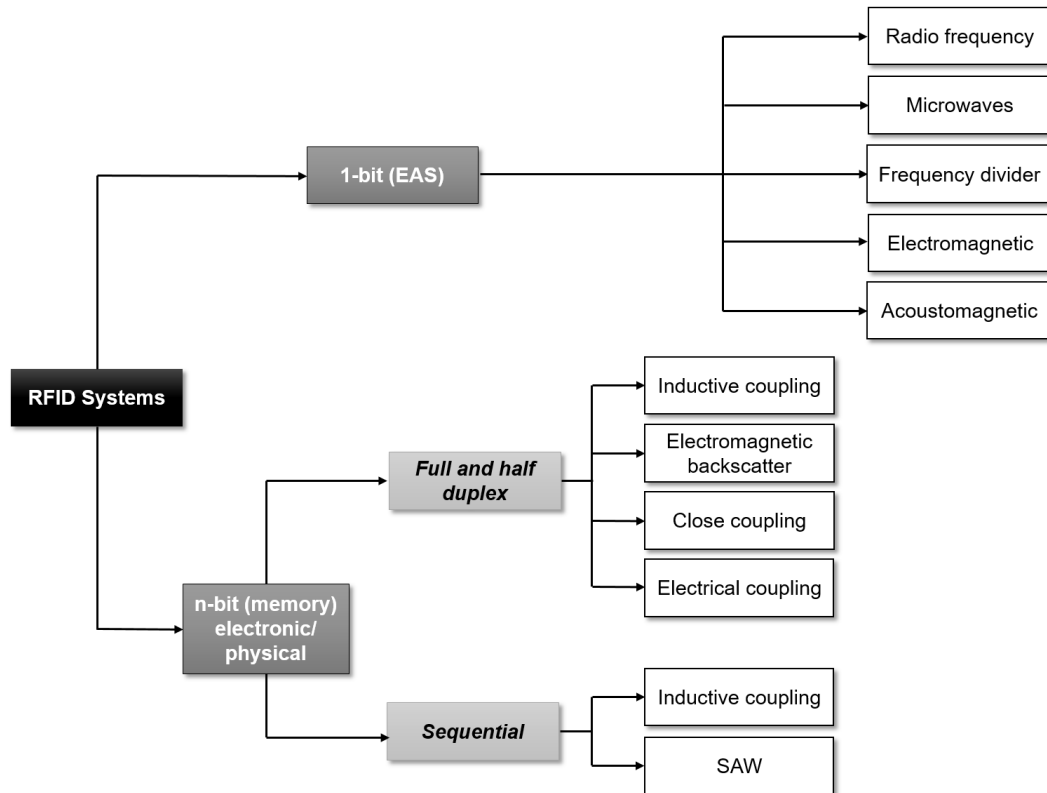


Figura 10: Princípio de funcionamento dos sistemas RFID [15]

Nos sistemas 1-Bit *transponder*, o princípio de funcionamento centra-se na transmissão de um bit de informação entre a *tag* e o *reader*. Neste contexto, apenas existem dois estados que representam este sistema: “*tag in the field*” e “*no tag in the field*”, isto é, deteta a *tag* (ou não), no raio de ação, respetivamente [15]. Os *tags* pertencentes a este grupo não carecem de grandes quantidades de informação nem de eletrónica complexa para o seu funcionamento [26].

Estes sistemas são utilizados principalmente em sistemas antirroubo EAS, caracterizados como sistemas do tipo *On-Off*, existentes em sistemas de alarme de lojas, supermercados e bibliotecas (figura 11).

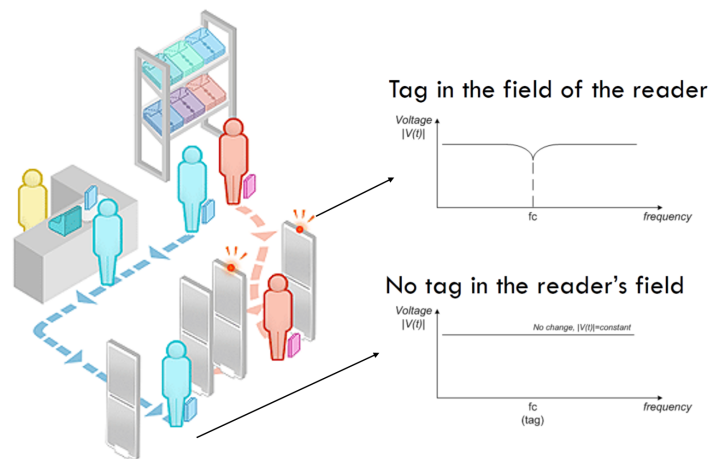


Figura 11: Sistema EAS [28, 29]

Tal como se pode observar na figura acima, caso o objeto que contenha a *tag* for comprado, esta será desativada o que permitirá que o alarme não dispare aquando da saída da loja; caso o cliente tente sair da loja com o objeto sem ir à caixa de pagamento, o *reader* detetará a *tag*, pela variação de tensão na antena do leitor, despoletando o alarme antirroubo.

Nos sistemas n-bit existe transmissão de maior quantidade de informação, sendo necessário a transferência de dados, podendo existir processos de controlo de fluxo de dados entre a *tag* e o *reader*. Este tipo de sistema é utilizado em *tags* para fins de localização, pois permite a monitorização do deslocamento da *tag* numa determinada área no alcance do *reader* [26]. A transação de dados existentes entre o *reader* e a *tag* pode ser executada em três formatos diferentes de comunicação (figura 12): *Full duplex* (FDX), *Half Duplex* (HDX) e *Sequential* (SEQ) [15].

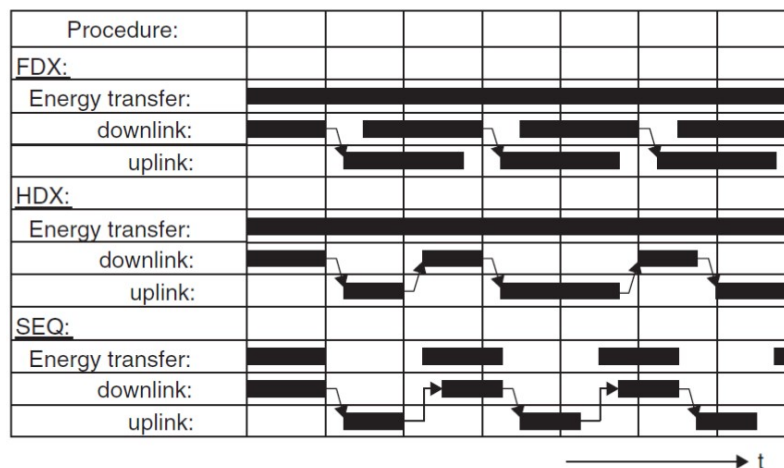


Figura 12: Características da transmissão FDX, HDX e SEQ [15]

Na transmissão FDX a informação é enviada nos dois sentidos simultaneamente, sendo a comunicação $reader \rightarrow tag$ designada por *downlink* e $tag \rightarrow reader$ por *uplink*. Neste tipo de transmissão a energia é transferida constantemente [21, 30].

Os sistemas HDX distinguem-se dos sistemas FDX pelo facto de o *reader* e a *tag* transmitirem um de cada vez. A transferência de dados realiza-se nos dois sentidos, mas ora está a ocorrer *downlink* ou *uplink*, ou seja, nunca em simultâneo. Esta diferença na transmissão de dados permite uma maior simplicidade na eletrónica envolvida, constituindo-se uma vantagem deste tipo de sistemas. Contudo, apesar de não serem constantemente enviados dados, a transferência de energia continua a ser constante, tal como os sistemas FDX [8, 22, 27].

A transmissão SEQ revela-se semelhante aos sistemas HDX, diferindo apenas no modo de transmissão de energia. Nestes sistemas, o *reader* deixa de emitir um sinal contínuo de energia, resultando numa maior poupança de energia. No entanto, têm de existir cuidados no desenvolvimento da *tag*, dado que esta terá que transmitir os seus dados durante os intervalos de tempo em que o *reader* cessa a transferência de energia. Geralmente, a *tag* possui um condensador que garante o armazenamento de energia, sendo utilizado no *uplink* [8, 21].

2.6 Tipos de comunicação

Existe uma enorme variedade de princípios de funcionamento que operam nos sistemas RFID. De facto, existem três tipos de sistemas principais distinguidos consoante o tipo de comunicação que estabelecem: acoplamento indutivo, acoplamento eletromagnético e acoplamento por ondas acústicas de superfície (em inglês *Surface Acoustic Wave* – SAW). Designa-se por acoplamento o processo de comunicação no qual um sinal é transmitido via wireless entre a *tag* e o *reader* [15].

2.6.1 Acoplamento indutivo

Uma *tag* indutiva é essencialmente constituída por um chip e um condutor de grande área em forma de *loop* que funciona como uma antena. Este tipo de sistemas somente utiliza o campo magnético, funcionando de modo semelhante a um transformador, onde a antena do *reader* corresponde ao primário e a antena da *tag* ao secundário. A tensão induzida na antena da *tag*, pelo efeito do campo magnético oriundo do *reader*, é retificada e utilizada para alimentar o circuito interno do *transponder*. Estes sistemas operam normalmente a baixas frequências, na ordem das bandas *Low Frequency* (LF): <135 kHz e *High Frequency* (HF): ~13,56 MHz. Geralmente, as antenas deste tipo de sistemas são simples bobinas, visto que se as antenas convencionais operassem nestas frequências iriam ter um dimensionamento inexequível [21]. Este tipo de sistema depende de enormes fatores, onde se destaca a eficiência de transmissão. Esta é dependente da frequência de operação, da área da bobina, do alinhamento entre a bobina do *reader* e da *tag*, assim

como da distância entre o *reader* e da *tag*, dado que o campo magnético decai com o cubo da distância [27, 31].

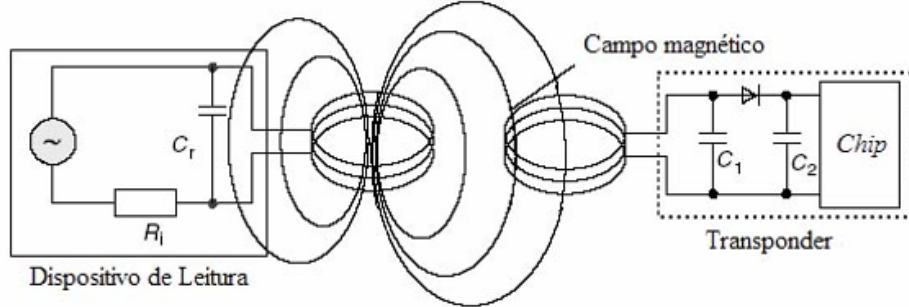


Figura 13: Sistema RFID por acoplamento indutivo [32]

2.6.2 Acoplamento eletromagnético

O acoplamento eletromagnético difere do tipo indutivo dado que, além de utilizar o campo magnético, recorre também ao campo elétrico para a propagação de ondas de rádio, o que resulta num maior alcance. Deste modo, revela-se como o sistema mais largamente utilizado, sendo semelhante ao sistema utilizado na aviação (RADAR). Normalmente, este tipo de sistema opera a alta frequências, na ordem da banda UHF (860-960 MHz e 2.45 GHz). Devido a este facto, os comprimentos de onda são muito baixos, o que possibilita a construção de antenas de reduzidas dimensões e de elevada eficiência [21]. Na figura seguinte encontra-se representado um esquema deste tipo de sistemas: as ondas de rádio são enviadas pelo ar do *reader* para a *tag*, que irá refletir parte delas de volta para o *reader* [32, 33].

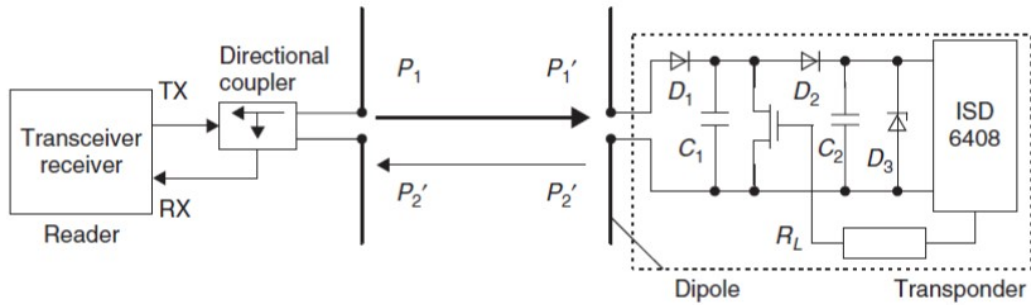


Figura 14: Sistema RFID por acoplamento eletromagnético [15]

2.6.3 Acoplamento por SAW

Este tipo de acoplamento é baseado em ondas acústicas de superfície, ou seja, no efeito piezoelétrico e na dispersão superficial elástica da onda acústica a baixas velocidades [15]. Este sistema tem diversas aplicações, desde dispositivos eletrônicos, tais como em linhas de atraso, filtros ou *duplexers*, a sensores de temperatura [34]. Os dispositivos SAW permitem a operação em ambientes não favoráveis, onde o uso de outros métodos convencionais se revela impraticável, dispendioso ou até mesmo perigoso [35]. Geralmente, este tipo de sistema opera nas gamas de frequência UHF e micro-ondas [8].

A figura seguinte ilustra um dispositivo SAW, contendo um *Inter-Digital Transducer* (IDT), utilizado para conversão de sinais elétricos em ondas acústicas de superfície e vice-versa, superfícies de reflexão criadas com elétrodos planares, e uma antena para receber e enviar o sinal de e para o *reader* [15].

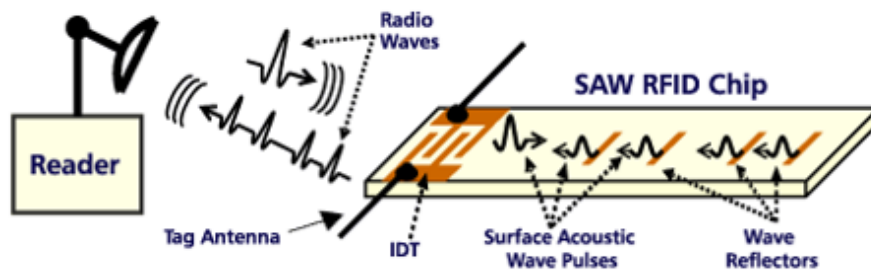


Figura 15: Sistema RFID por acoplamento SAW [36]

O *reader* gera um pulso interrogador de alta frequência, que é captado pela antena da *tag*, sendo depois convertido pelo IDT numa vibração (SAW) que se espalha longitudinalmente no substrato. A frequência da SAW corresponde à frequência da portadora do impulso de amostragem. Esta vibração viaja dentro do material até encontrar os refletores. Aqui, parte da onda é refletida enquanto a restante percorre até ao final do substrato, onde é absorvida. As partes refletidas chegam ao IDT, que as reconverte numa sequência de pulsos de alta frequência, enviando-as ao *reader*. O número de pulsos desta sequência está intimamente relacionado com o número de refletores existentes no interior da *tag* [15].

2.7 Frequências de operação, potências máximas e alcance

Os sistemas RFID, por gerarem e radiarem ondas eletromagnéticas, são classificados como sistemas de rádio. Sendo assim, como todos os outros sistemas de rádio, são igualmente sujeitos a imposições e limitações, de modo a evitar interferência entre eles. Naturalmente que, num projeto de um sistema RFID, é tido em consideração os espectros de frequência dos outros sistemas de rádio, visto que estes limitam significativamente a

gama de frequências adequadas e disponíveis no mercado (figura 16) [15]. É por este motivo que, geralmente se utilizam frequências destinadas especificamente a aplicações industriais, científicas ou médicas: as bandas *Industrial Scientific and Medical* [26, 37]. As bandas ISM não necessitam de licenciamento, o que resulta numa elevada disputa por uma porção do espectro. Neste sentido, emergiu a necessidade de um controlo exigente por parte das entidades reguladoras de cada país, assim como de um consenso a nível mundial na alocação e coordenação das frequências de rádio. Apesar de não ter sido possível encontrar uma banda de funcionamento standard mundialmente, encontrou-se a solução de dividir o mundo em três grandes áreas regulamentares (figura 17), definidas pelo *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector* (ITU-R) [8, 15].

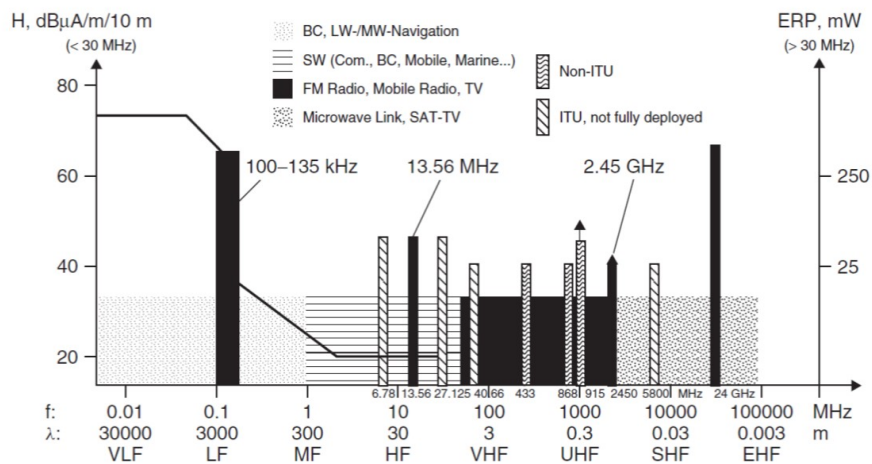


Figura 16: Frequências de operação e potências máximas em sistemas RFID [15]

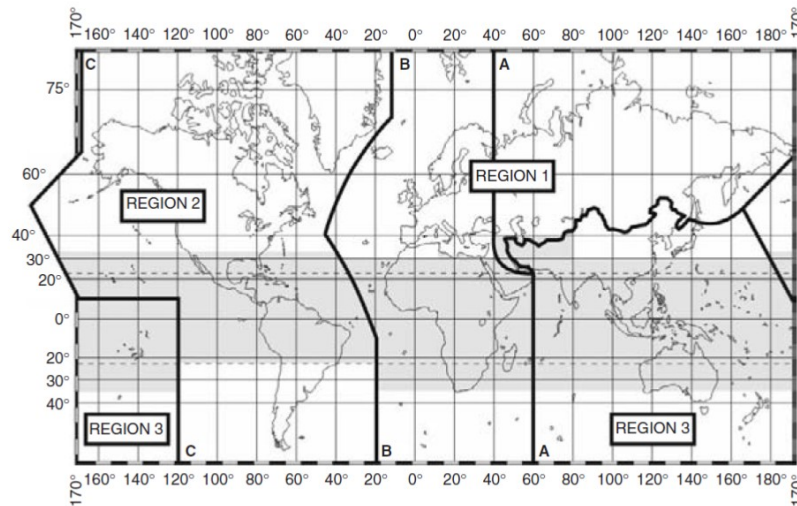


Figura 17: Divisão do mundo em 3 regiões geográficas pela ITU-R [15]

Como se pode observar pela figura 17, a região 1 engloba a Europa, África, o norte da Ásia e países do médio Oriente; a região 2 abrange todo o continente americano e a região 3 é composta pelo sul da Ásia e Oceânia [15]. Cada país deve assim cumprir as várias normas reguladoras da região geográfica em que se insere.

A tabela seguinte referencia e categoriza as frequências de operação mais adotadas em sistemas RFID, destacando o seu alcance máximo, potencialidades, limitações e aplicações atuais.

Tabela 2: Frequências de operação dos sistemas RFID [15, 27, 37]

Frequência	Frequências Típicas	Tipo de Acoplamento	Tipo de tag e Alcance	Vantagens e Desvantagens	Aplicações
LF (30 kHz a 300 kHz)	125 kHz 135 kHz	Indutivo	Passivo < 10 cm	↑ Boa penetração em líquidos e metais ↓ Baixa taxa de transferência (<1kbit/s) ↓ Baixo alcance	• Controle de acesso • Identificação animal • Controle de inventário
HF (3 MHz a 30 MHz)	6.78 MHz 13.56 MHz 27.125 MHz		Passivo < 1 m	↑ Penetração média em líquidos ↓ Potência elevada no reader	• Controle de acesso • Smart cards • Sistemas EAS
UHF (300 MHz a 3 GHz)	433 MHz	Eletromagnético (backscatter)	Ativo < 100 m	↑ Maior alcance ↑ Razoável em ambientes com metais ↓ Necessita de linha de vista	• Localização de veículos • Portagens
	860-960 MHz		Ativo Passivo < 4 m (EU) < 10 m (US)	↑ Maior alcance ↓ Necessita de linha de vista ↓ Altamente afetado por líquidos e metais	
Microondas (300 MHz a 300 GHz)	2.45 GHz	SAW	Passivo < 3 m	↑ Alta taxa de transferência (~100kbit/s) ↓ Necessita de linha de vista ↓ Altamente afetado por líquidos e metais	• Linhas de produção automóvel • Wi-Fi • Bluetooth • Colheita de dados em tempo real
	24.05-24.5 GHz (uso futuro)		Semi-passivas < 50 m		

O alcance revela-se um parâmetro fundamental na caracterização dos sistemas RFID. Os sistemas de curto alcance operam em gamas LF, os de médio alcance na gama HF e os de longo alcance na gama UHF e micro-ondas. É possível obter-se um longo alcance quanto o desejado, sendo apenas necessário aumentar a potência do *reader*. Contudo, isto é impraticável, dado que uma potência excessivamente alta coloca em risco a saúde das pessoas. É neste seguimento que, de modo a evitar esta situação de perigo, estão estabelecidas potências máximas permitidas pelas faixas de frequências em sistemas RFID (figura 16) [15, 22].

2.8 Protocolos

A elevada difusão de sistemas desenvolvidos e as distintas bandas de frequência utilizadas nas diferentes regiões geográficas, levam a que seja necessário a criação de normas e procedimentos uniformizados, visando a compatibilidade e interoperabilidade entre os

vários sistemas [21]. Esta uniformização define características de operação e de funcionamento de equipamentos, para que diferentes fabricantes consigam gerar dispositivos com características comuns e detentores da versatilidade necessária para serem utilizados noutra região do mundo. Existem inúmeras organizações envolvidas nos projetos RFID que trabalham com diversos fabricantes, com intuito de estabelecerem protocolos e regras para a adequada utilização da tecnologia RFID. A *International Organization for Standardization* (ISO) é uma das principais e mais influentes organizações, englobando cerca de 163 países [38]. A ISO em conjunto com uma outra organização, a *International Electrotechnical Commission* (IEC), formam o comité técnico conjunto ISO/IEC, que se traduz no organismo responsável pela aprovação de normas/standards em todos os campos técnicos a nível mundial [37].

A seguinte tabela referencia os principais standards da tecnologia RFID e as suas aplicações.

Tabela 3: Padrões ISO para a tecnologia RFID [37, 38]

ISO Standard	Aplicação
ISO 11784	Estrutura do código RFID para animais
ISO 11785	Conceito técnico RFID para animais
ISO/IEC 14443	Identificação de cartões - Cartões de proximidade
ISO/IEC 15693	Identificação de cartões - Cartões de vizinhança
ISO/IEC 18001	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens
ISO/IEC 18000-1	Tecnologia de Informação - Arquitetura de Referência e definição de parâmetros a padronizar
ISO/IEC 18000-2	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - parâmetros para comunicação por interface por ar abaixo dos 135 kHz
ISO/IEC 18000-3	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - parâmetros para comunicação por interface por ar para 13.56 MHz
ISO/IEC 18000-4	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - parâmetros para comunicação por interface por ar a 2.45 GHz
ISO/IEC 18000-6	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - parâmetros para comunicação por interface por ar entre 860 a 960 MHz
ISO/IEC 15961-1	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - Protocolo de dados: interface de aplicação
ISO/IEC 15961-2	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - Protocolo de dados: registo de construções de dados de RFID
ISO/IEC 15961-3	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - Protocolo de dados: construção de dados de RFID
ISO/IEC 15961-4	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - Protocolo de dados: comandos de interface de aplicação para bateria externa e funcionalidade de sensor
ISO/IEC 15962	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - Protocolo de dados: regras de codificação de dados e funções de memória lógica
ISO/IEC 15963	Tecnologia de Informação - RFID para controlo de itens - Identificador único para tags RF

Capítulo 3

Antenas

As antenas são dispositivos fundamentais em matéria de telecomunicações, capazes de transformar o domínio elétrico em domínio eletromagnético e vice-versa, revelando-se num elemento primordial na comunicação por RF [22, 39]. Pela relevância que ostentam, serão abordadas detalhadamente no decorrer deste capítulo.

3.1 Conceitos fundamentais

Uma antena pode ser caracterizada por diversos parâmetros, pelo que, de seguida serão mencionados, descritos e analisados os mais pertinentes.

3.1.1 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação de uma antena consiste numa representação gráfica das suas propriedades de radiação em função das coordenadas espaciais. Normalmente, este é relativo à zona de campo distante e representado em três dimensões, a fim de se ilustrar graficamente a intensidade de radiação, a diretividade, a fase ou a polarização [40, 41]. A figura 18 representa um diagrama de radiação: o lobo principal, onde a intensidade de radiação é máxima e os lobos secundários que estão direcionados noutros sentidos, não contribuindo para o desempenho da antena. Este tipo de representação gráfica revela-se um instrumento excelente na determinação da zona de interrogação dos sistemas RFID, que permite observar as zonas de operação ótimas (lobo principal) e as fontes de interferência (lobos secundários) [40].

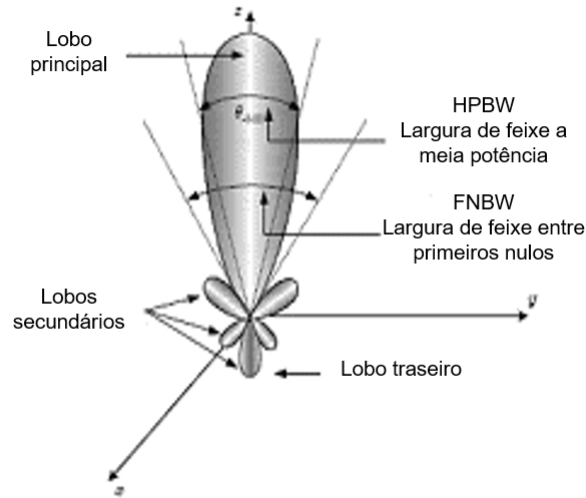


Figura 18: Diagrama de radiação de uma antena [41]

Consoante o seu diagrama de radiação, as antenas podem ser classificadas como [40]:

- **Antena isotrópica** – radia de igual modo em todas as suas direções. Apesar de ideal, não é exequível fisicamente, contudo serve de referência para expressar as propriedades direcionais de antenas reais (figura 19a);
- **Antena direcional** – radia ondas eletromagnética mais eficientemente em determinadas direções no espaço comparativamente a outras antenas. São prediletas quando se pretende que uma antena apenas radie e receba ondas eletromagnéticas numa determinada direção (figura 19b);
- **Antena omnidirecional** – corresponde a um tipo particular de diagrama direcional: apresenta um plano essencialmente não direcional num determinado plano e um diagrama direcional em qualquer outro plano ortogonal (figura 19c).

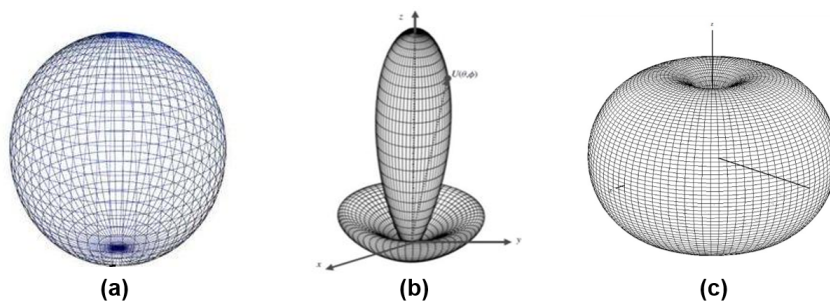


Figura 19: Diagrama de radiação isotrópico, direcional e omnidirecional [40, 42, 43]

3.1.2 Diretividade

A diretividade (D) de uma antena corresponde ao seu quociente entre a intensidade de radiação numa determinada direção (U) e a intensidade de radiação média em todas as direções (U_0), onde esta última é igual à potência total radiada pela antena (P_{rad}) dividida por 4π – equação 1. O valor vem, geralmente, expresso em dBi que representa o ganho em decibéis relativamente a um radiador isotrópico [14].

De um modo simplificado, a diretividade mede até que ponto uma antena é capaz de concentrar a sua energia num determinado ângulo sólido, sendo que quanto menor for este ângulo, maior será a diretividade da antena [40, 44]. Portanto, o conceito de diretividade refere-se à descrição das propriedades direcionais de uma antena.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

3.1.3 Eficiência de radiação

Um parâmetro muito importante na projeção de uma antena é a sua eficiência de radiação. Esta contabiliza as perdas presentes na antena, visto que nem toda a potência entregue à antena é radiada. A eficiência de radiação (e_{cd}) define-se pela razão entre a potência radiada pela antena (P_{rad}) e a potência entregue a esta (P_{in}) – equação 2 [14].

$$P_{rad} = e_{cd}P_{in} \quad (2)$$

Existem essencialmente três tipos de fontes de perdas: por desadaptação (e_r), perdas nos condutores (e_c) e perdas nos dielétricos (e_d). Neste sentido, a eficiência total do sistema (e_0) pode ser descrita pela equação 3 [14].

$$e_0 = e_r e_c e_d = e_{cd} e_r \quad (3)$$

3.1.4 Ganho

O ganho é outro parâmetro que permite descrever o desempenho de uma antena. Define-se pelo quociente entre a intensidade de radiação numa determinada direção e a intensidade de radiação que se obtinha caso a potência aceite pela antena fosse radiada de forma isotrópica (P_{in}) – equação 4 [40].

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (4)$$

O ganho está diretamente relacionado com a diretividade de uma antena, tendo ainda em consideração a sua eficiência de radiação. Esta relação é demonstrada na seguinte equação [40].

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (5)$$

3.1.5 Frequência de ressonância

Uma antena transmite e recebe ondas eletromagnéticas mais eficientemente numa frequência do que noutras, dependendo do seu desenho (tamanho, forma, entre outros). Estas frequências são designadas por frequência de ressonância [9].

3.1.6 Largura de banda

A largura de banda de uma antena consiste numa gama de frequências onde as características das antenas, tais como diagrama de radiação, ganho, impedância de entrada, polarização e eficiência de radiação, se mantêm dentro de um valor aceitável em relação ao pretendido para o projeto na frequência central [40]. Na prática, assume-se que a largura de banda é definida pelo $|S_{11}|$, que corresponde ao *return loss*, sendo esta referente à gama de frequências onde $|S_{11}| \leq -10$ dB [40].

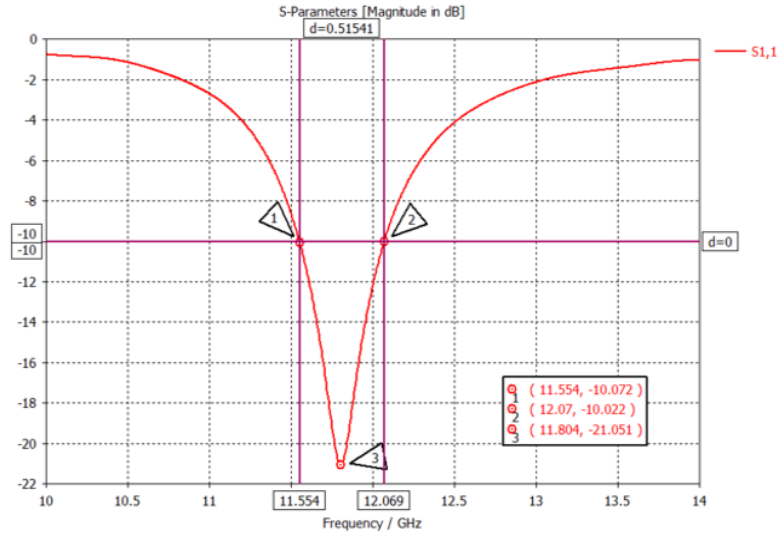


Figura 20: $|S_{11}|$ em função da frequência [45]

Observando a figura 20, facilmente se conclui que a largura de banda corresponde à gama de frequências entre o *marker* 1 e o *marker* 2 ($11.804 - 11.554 \text{ GHz} \approx 515 \text{ MHz}$). Um $|S_{11}| = -10 \text{ dB}$ indica que a eficiência da antena na transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas é de aproximadamente 90% [9].

3.1.7 Impedância de entrada

A impedância de entrada corresponde à impedância que a antena apresenta aos seus terminais ou à relação entre a tensão e a correntes nos seus terminais [40]. Revela-se como um dos parâmetros de maior importância, pois a eficiência da transferência de energia depende diretamente deste, onde para esta ser máxima, a antena deve apresentar aos seus terminais a impedância complexa conjugada da carga (impedância do IC).

Matematicamente, a impedância de entrada pode ser definida pela seguinte equação, onde Z_a corresponde à impedância de entrada aos terminais da antena, R_a à parte real da impedância da antena (resistência) e X_a à parte imaginária da impedância da antena (reatância) [39].

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a \quad (6)$$

A parte real da antena (R_a) é composta por duas resistências (equação 7): a resistência de radiação (R_r), utilizada para representar a radiação pela antena, e a resistência de perdas (R_L), usada para representar as perdas dielétricas e por condução, ou seja, a potência dissipada na antena [40].

$$R_a = R_r + R_L \quad (7)$$

Na figura seguinte pode-se observar um modelo de uma antena em que aos seus terminais se encontra ligado uma carga (IC).

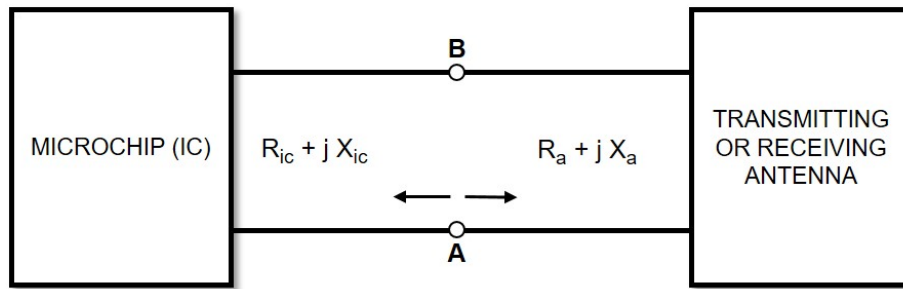


Figura 21: Modelo de uma antena em modo de recepção e transmissão [46]

O coeficiente de reflexão (ρ) é um parâmetro que quantifica a adaptação da antena, relacionando a impedância do chip com a impedância da antena aos seus terminais.

$$\rho = \frac{Z_{ic} - Z_a}{Z_{ic} + Z_a} \quad (8)$$

$$Z_{ic} = R_{ic} + jX_{ic} \quad (9)$$

Como referido anteriormente, para a transferência de energia ser máxima, é necessário que a impedância da antena seja a complexa conjugada do chip, isto é, $\rho \approx 0$. Nestas condições tem-se que:

$$R_a = R_{ic} \quad \cap \quad X_a = -X_{ic} \quad (10)$$

Assim sendo, o sistema apresentará a máxima eficiência possível, sendo capaz de receber na carga (chip RFID) 50% da energia captada pela antena [40].

Geralmente, a impedância da entrada é representada em função da frequência. Contudo, a sua representação por expressões analíticas é de difícil obtenção na maioria dos casos, dado que esta varia de forma complexa com a frequência [40]. Neste contexto, a impedância de entrada é normalmente determinada experimentalmente ou com recurso a programas de simulação de antenas, como por exemplo o *Computer Simulation Technology* (CST).

3.1.8 Polarização

A polarização de uma antena define-se pela polarização da onda radiada transmitida por esta. A polarização da onda radiada corresponde à curva traçada do vetor campo elétrico, ao longo do tempo e num determinado ponto do espaço, onde o sentido desta é observado ao longo da direção da propagação da onda eletromagnética [40].

Existem diferentes tipos de polarização, sendo estes classificados como: polarização linear (figura 22a), polarização circular (figura 22b) ou polarização elíptica, que corresponde ao caso geral (figura 22c).

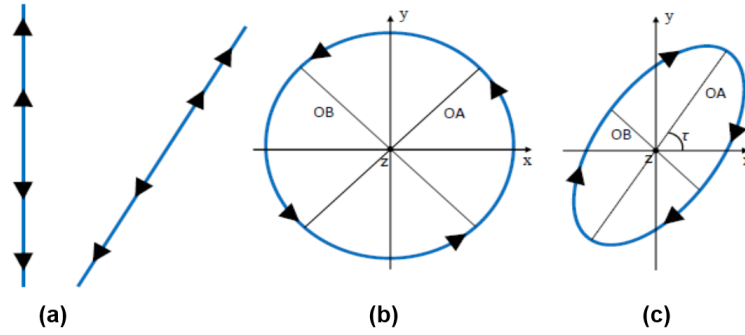


Figura 22: Diferentes tipos de polarização [47]

As polarizações circulares e elípticas podem ainda ser classificadas quanto ao sentido de rotação. Caso o observador verifique a onda a afastar-se e a rodar no sentido dos ponteiros do relógio, considera-se estar perante uma polarização direita (figura 23), caso contrário, encontra-se perante uma polarização esquerda.

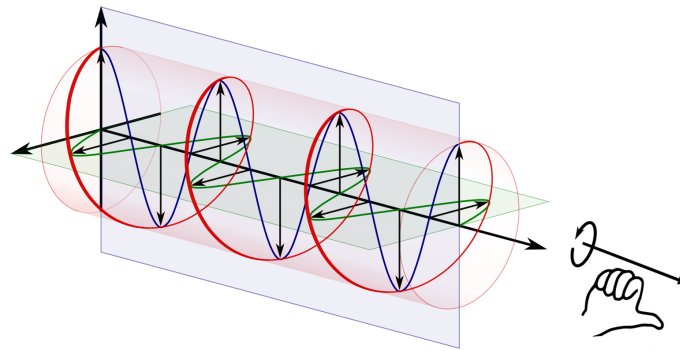


Figura 23: Polarização circular direita [48]

3.2 Tipos de antenas convencionais

Existem antenas com características completamente díspares uma das outras, o que reflete a sua diversidade. Nesta perspetiva, aquando da necessidade de utilização de uma antena num sistema, é importante conhecer as particularidades que pretendemos para o sistema. Segue-se assim uma análise de várias antenas tradicionalmente utilizadas.

3.2.1 Antenas filamentosas

As antenas filamentosas (em inglês *wire antennas*) são as mais conhecidas pela sociedade atual, por se encontrarem presentes em inúmeros locais do quotidiano de uma pessoa, como em prédios, carros, entre outros.

Neste grupo de antenas, podem ser inseridas antenas de diversos formatos, sendo os mais relevantes o monopolo (figura 24a), o dipolo (figura 24b), a antena loop (figura 24c), antena helicoidal (figura 24d), entre outras [40].

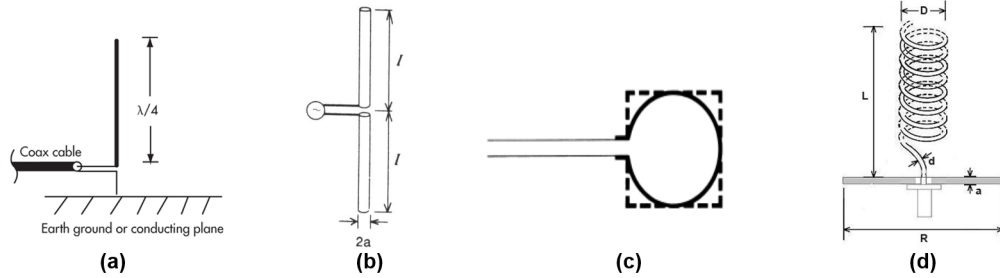


Figura 24: Diferentes configurações de antenas filamentosas [40, 49, 50, 51]

Pela relevância que ostentam nesta dissertação, serão aprofundadas as antenas loop e dipolo de meia-onda, bem como a técnica de acoplamento indutivo que se pode utilizar para a adaptação da primeira.

Antena *loop*

A antena *loop*, caracterizada por ser simples e económica de se produzir, pode adotar inúmeras formas, tais como quadrado (figura 25a), circular (figura 25b), triangular (figura 25c), elíptica (figura 25d), entre outras [39]. Entre os diversos formatos, os mais utilizados na prática são o *loop* circular e o *loop* quadrado, pela sua simplicidade de construção e análise inerentes. Além disso, verifica-se que um *loop* pequeno (circular ou quadrado) equivale a um dipolo magnético infinitesimal, cujo eixo é perpendicular ao plano da *loop*, pelo que os campos radiados por este tipo de antenas têm a mesma forma matemática que os radiados por um dipolo magnético infinitesimal [40].

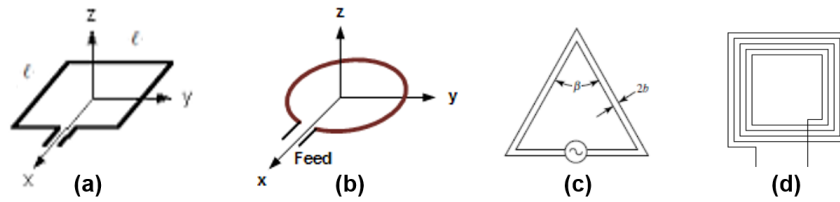


Figura 25: Diferentes configurações de antenas *loop* [40, 52, 53, 54]

As antenas *loop* podem ser classificadas segundo o seu tamanho elétrico em: *loop* eletricamente pequeno e *loop* eletricamente grande. No primeiro o comprimento total (perímetro, C) é pequeno, correspondendo a menos de um décimo do comprimento de

onda ($C < \lambda/10$) no espaço livre. Geralmente, estes são utilizados como antenas recetoras em rádios portáteis, como antenas direcionais para a deslocação de ondas de rádio ou como sondas com medidores de campo de força. Já no segundo, o comprimento total é na ordem do comprimento de onda no espaço livre ($C \approx \lambda$). Estes são normalmente utilizados como elementos em *arrays* direcionais tais como em antenas helicoidais, Yagi-Uda *arrays*, *quad arrays*, entre outros [40].

Com apenas uma volta, o *loop* eletricamente pequeno, apresenta resistências de radiação muito baixas comparadas com as resistências de perda. A resistência de radiação pode ser ligeiramente ampliada, aumentando o comprimento total desta e/ou acrescentando mais voltas, mas continua a ser baixa, motivo pelo qual geralmente são utilizadas como antenas recetoras, onde as perdas não são tão importantes como a relação sinal/ruído (em inglês *signal-to-noise ratio* – SNR) [40, 55].

Independentemente da sua forma, o *loop* eletricamente pequeno apresenta um diagrama de radiação semelhante ao dipolo infinitesimal, mas com um nulo perpendicular ao plano do *loop* e com o seu máximo ao longo do plano do *loop* (figura 26). Todavia, à medida que se aumenta o comprimento total do *loop* para a ordem do comprimento de onda, o máximo do diagrama de radiação desloca-se para o eixo do *loop*, perpendicular ao plano deste, onde antes se tinha um nulo [40, 55].

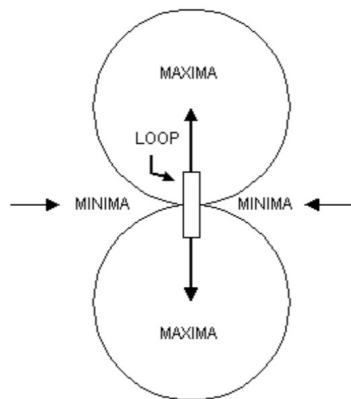


Figura 26: Diagrama de radiação de um *loop* eletricamente pequeno [56]

Considerando um *loop* quadrado eletricamente pequeno (figura 27) e tendo em consideração que este se encontra intimamente relacionado com o objeto de estudo da dissertação, serão descritas algumas equações de interesse desta antena.

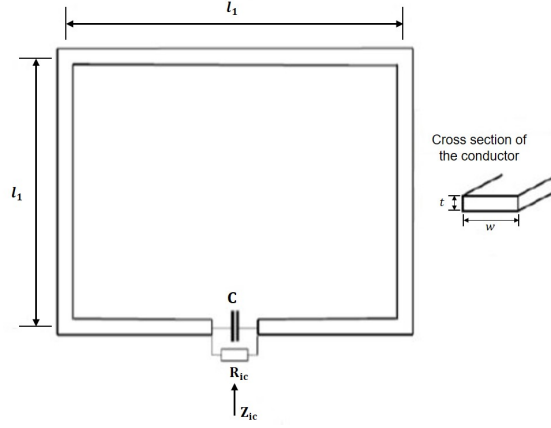


Figura 27: Antena *loop* quadrada com chip [57]

Na figura acima representada, l_1 representa o comprimento dos lados da antena *loop* (em metros) medido a partir do centro da linha, t a espessura da linha condutora (em metros) e w a largura da linha condutora (em metros).

Tendo em conta as dimensões da antena, é possível calcular o seu comprimento total (l) e a área (A) do *loop* (em metros quadrados) pelas seguintes equações [57]:

$$l = 4 \times l_1 \quad (11)$$

$$A = l_1 \times l_1 \quad (12)$$

O *loop* quadrado com lados l_1 e raio do fio b pode ser encarado como uma indutância, obtido através da equação 13. De referir que μ_0 representa a permeabilidade do espaço livre e é dada pela equação 14 [40, 57].

$$L_A = 2\mu_0 \frac{l_1}{\pi} \left[\ln \frac{l_1}{b} - 0.774 \right] \quad (13)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.256E-6 \text{ H/m} \quad (14)$$

No entanto, a equação 13 assume o condutor como uma secção transversal circular de raio b , como se de um fio condutor se tratasse, pelo que o raio efetivo b de uma linha condutora impressa pode ser calculado pela seguinte expressão [57]:

$$b = 0.35 \times t + 0.24 \times w \quad (15)$$

A resistência de radiação de um *loop* quadrado eletricamente pequeno pode ser facilmente obtida através da seguinte equação:

$$R_r = 20 \left(\frac{2\pi l_1}{\lambda} \right)^4 = 20 \left(\frac{C}{\lambda} \right)^4 \quad (16)$$

Como referido anteriormente, a resistência de radiação representa o mecanismo de radiação da antena, onde a potência é transferida do condutor para o espaço livre, sendo considerado um bom tipo de mecanismo de perdas [57]. Contudo, existem outros mecanismos de perdas presentes nas antenas, em concreto a resistência de perdas que corresponde à potência dissipada na antena. Esta resistência pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$R_L = \frac{l}{C} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (17)$$

Onde o ω representa a frequência angular e o σ a condutividade do metal.

Portanto, a razão entre a resistência de radiação e a resistência total equivalente, corresponde à eficiência de radiação (e_{cd}), tal como se pode observar na seguinte equação:

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_L + R_r} \right] \quad (18)$$

Este tipo de antenas, detentoras de comprimentos totais pequenos comparados com o comprimento de onda no espaço livre, possuem resistências de radiação muito baixas, usualmente inferiores às resistências de perdas. Neste contexto, são consideradas fracas radiadoras, sendo pouco utilizadas como mecanismo de transmissão em comunicações de rádio [40, 58].

Antena dipolo de meia onda

O dipolo de meia-onda é considerado das mais simples antenas práticas do ponto de vista teórico, sendo por isso muito utilizadas [14, 58]. Como a sua resistência de radiação é cerca de 73Ω , valor muito próximo a algumas das linhas de transmissão existentes (50Ω ou 75Ω), a sua adaptação à linha é bastante simplificada na ressonância da antena [39, 40]. Este tipo de antena, na sua forma mais simples, é provido de apenas um simples troço de linha, por exemplo um fio de cobre, de comprimento $l = \lambda/2$, com uma separação a meio do caminho (figura 28) [15].

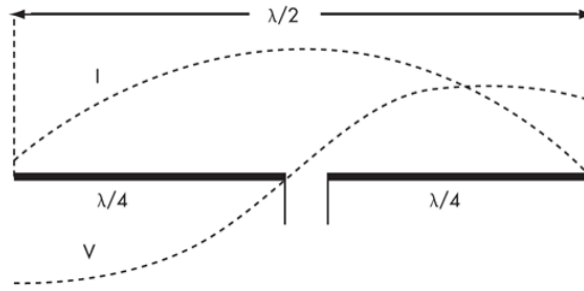


Figura 28: Dipolo de meia-onda: distribuição da tensão e corrente ao longo deste [59]

Como se pode observar pela figura acima representada, à frequência de ressonância, que corresponde à frequência onde o comprimento total do dipolo é igual à metade do comprimento de onda, obtém-se um mínimo de tensão e um máximo de corrente no centro da antena, onde a impedância é mínima [58]. Esta antena tem a capacidade de radiar a sua energia em sua volta, apresentando uma forma parecida a um donut (ou toróide) no seu diagrama de radiação, onde a energia mais elevada é radiada perpendicularmente à antena. Geralmente, a diretividade deste tipo de antena é cerca de 2.15 dBi, detendo uma vantagem atrativa em aplicações de identificação e detecção, dado que a comunicação pode ocorrer num plano omnidirecional [14]. A figura seguinte ilustra um diagrama de radiação 3D de um dipolo, bem como alguns cortes deste a 2D.

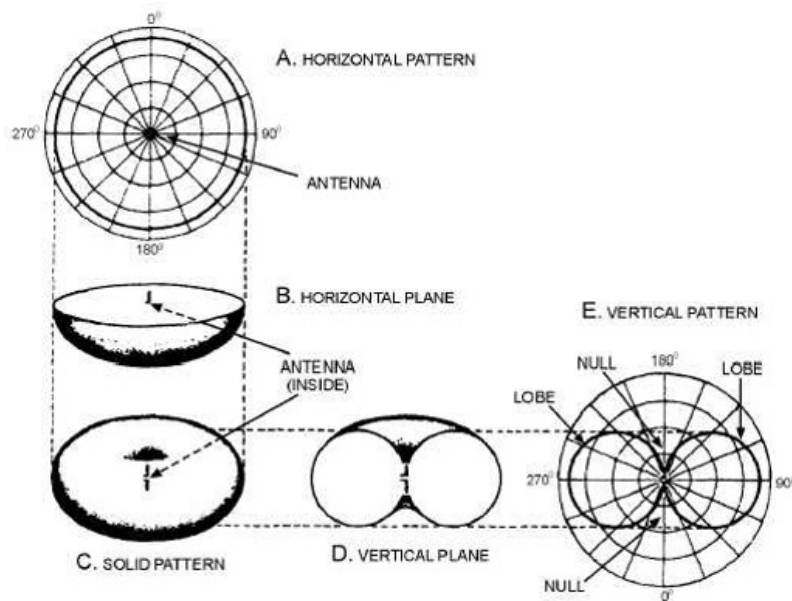


Figura 29: Diagrama de radiação de um dipolo em diferentes planos [60]

Acoplamento indutivo para duas configurações de antenas distintas

Um método que pode ser utilizado para adaptar a antena *loop* é o de adaptação por acoplamento mútuo, que representa uma das soluções ótimas teóricas na adaptação da antena. Um exemplo deste tipo de acoplamento pode ser observado na figura seguinte, onde se apresentam duas diferentes estruturas de configuração de antenas para o desenvolvimento de uma *tag* RFID passiva. A antena é constituída por um *feed loop*, em que aos seus terminais vai estar conectado o chip IC, que acopla ou comunica com a outra antena (estrutura denominada corpo radiante) através de acoplamento mútuo [14].

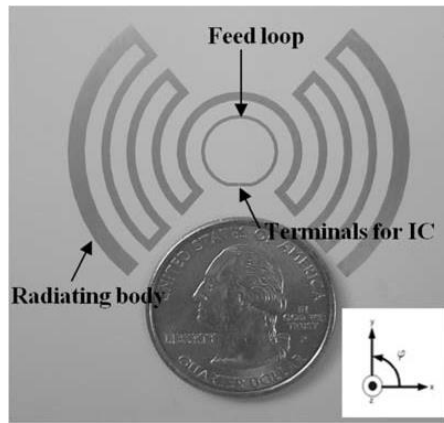


Figura 30: Antena acoplada indutivamente [14]

Assim sendo, pode-se definir este acoplamento mútuo por um circuito elétrico equivalente, que pode ser modelado por um transformador, tal como ilustrado na figura seguinte.

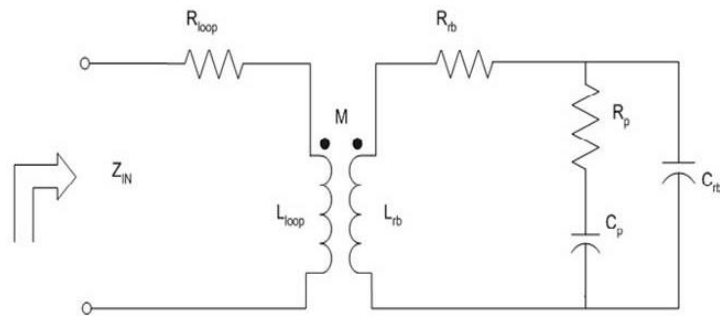


Figura 31: Circuito elétrico equivalente da antena acoplada indutivamente [14]

Onde R_{loop} e R_{rb} representam as resistências individuais do *feed loop* e do corpo radiante; M a impedância mútua e L_{loop} a indutância natural própria do *feed loop*; R_p e C_p representam os efeitos do substrato [14]. Esta estrutura é dimensionada para

uma determinada frequência de ressonância, onde assumindo que o efeito do substrato é mínimo, pode-se prever que a resistência de entrada da antena, R_{in} , e a reatância, X_{in} , podem ser previstas pelas seguintes equações [14]:

$$R_{zin} = \frac{(2\pi f_0 M)^2}{R_{rb}} + R_{loop} \quad (19)$$

$$X_{zin} = 2\pi f_0 L_{loop} \quad (20)$$

Tendo em conta as equações acima descritas é possível concluir que a resistência é controlada exclusivamente por M e R_{rb} , enquanto que a reatância é dependente apenas de L_{loop} . Portanto, a resistência de entrada da antena e a reatância podem ser ajustadas independentemente, o que significa que este método de adaptação apresenta uma simples e eficaz maneira de adaptar a impedância da antena a um chip de impedância arbitrária [14].

Logo, para este tipo de sistemas passivos RFID, este método constitui um grande benefício na medida em que é essencial uma adaptação quase perfeita entre a antena e o chip para este se ativar e maximizar o seu alcance de leitura.

3.2.2 Antenas de abertura

As antenas de abertura são hoje em dia mais conhecidas do que no passado, visto que a procura por antenas mais complexas e por frequências mais elevadas assim o impôs [40]. Este tipo de antenas é muito utilizado em UHF e em frequências ainda mais elevadas, para aplicações nas áreas de comunicações sem fios, biomedicina, aeronaves e veículos espaciais, entre outras [40, 61, 62].

As antenas de abertura, como por exemplo as antenas corneta, possuem um diagrama de radiação direcional e a capacidade de poderem ser excitadas por qualquer tipo de polarização, o que lhes confere a particularidade de serem bons padrões de laboratório [61, 62].

As antenas corneta têm como principais características a posse de diretividade moderada, baixo *Standing Wave Ratio* (SWR) e uma vasta largura de banda. Estas características, aliadas ao facto de serem de fácil construção e reajustamento revelam vantagens na sua utilização [63]. Estas antenas são utilizadas frequentemente nas medições dos campos eletromagnéticos, bem como nas medições do ganho de outras antenas [39].

As antenas de abertura podem adotar diferentes formas, como ilustra a figura 32.

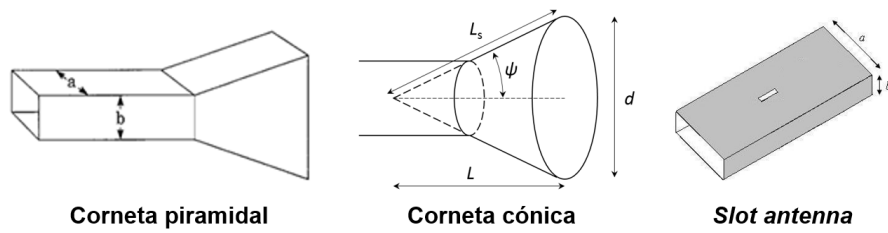


Figura 32: Diferentes configurações de antenas de abertura [63, 64, 65]

3.2.3 Antenas *microstrip*

As antenas *microstrip*, também conhecidas como antenas *patch*, consistem em dois condutores separados por um material dielétrico, como se pode observar pela figura 33. A utilização destas antenas tem-se revelado cada vez mais vantajosa, dado que elas podem ser impressas diretamente numa placa de circuito.

Estas antenas são discretas e capazes de dupla e tripla frequência de operação, apresentam um baixo custo e facilidade de produção, pelo que o seu desenvolvimento para aplicações de comunicações sem fios revela-se favorável, visto que nesta área, parâmetros como o peso, custo, desempenho e facilidade de instalação são limitados. No entanto, apresentam algumas limitações, como baixa eficiência, potência, largura de banda e pureza de polarização. Um dos métodos empregados para contornar estas inferioridades consiste na utilização de *arrays* de antenas *microstrip* [39, 40, 66].

Este tipo de antenas pode adotar diferentes formatos, como se observa na seguinte figura.

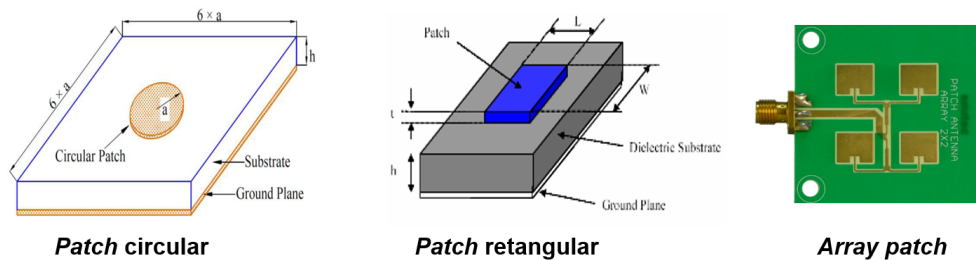


Figura 33: Diferentes configurações de antenas *microstrip* [67, 68, 69]

3.2.4 Antenas refletoras

As antenas refletoras, tal como se pode depreender pela sua designação, são capazes de refletir as ondas eletromagnéticas. Possuem ganhos de elevada magnitude, sendo por isso utilizadas em aplicações de alta frequência como comunicações a longas distâncias,

radares de alta resolução, bem como em radioastronomia e localização por satélite [39]. Estas antenas foram largamente estudadas e desenvolvidas durante a segunda guerra mundial, quando inúmeras aplicações de radar começaram a surgir, e a necessidade de comunicar a longas distâncias adveio [40, 70].

A antena parabólica, uma das antenas típicas que pertencem a esta categoria, utiliza uma superfície (condutora) de reflexão com o propósito de aumentar o ganho da antena, e uma pequena antena de alimentação, geralmente uma antena corneta, que se situa no ponto focal do refletor [70].

Na comunicação entre uma base transmissora e recetora, distanciadas a milhões de quilómetros de distância, são necessárias antenas de largas dimensões. A título de curiosidade, a maior antena construída até à data, situa-se na China e apresenta um diâmetro de 500 metros, sendo o maior radiotelescópio do mundo [71, 72]. A figura seguinte ilustra alguns dos mais relevantes formatos de antenas que integram esta categoria.

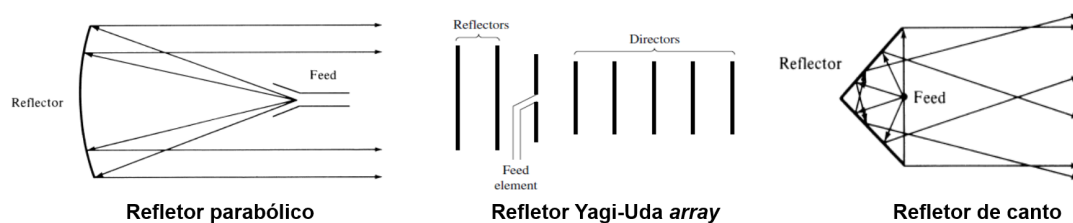


Figura 34: Diferentes configurações de antenas refletoras [40]

Capítulo 4

Construção das antenas RFID

O presente capítulo elucida sobre todo o processo de construção das diversas antenas desenvolvidas. A *tag* RFID incorporada em têxtil, de reduzidas dimensões e viável enquanto sistema de identificação, revelou ser o elemento principal de estudo e análise. Pretende-se que o elemento parasítico (têxtil) se encontre na parte frontal da camisola, como se de uma marca se tratasse, com a *tag* colocada sobre este, em que através de acoplamento se consiga obter um aumento do alcance de leitura (figura 35). Paralelamente a esta, a produção de outras duas antenas, uma desenvolvida somente em substrato têxtil e outra apenas em substrato FR-4, teve o propósito de servir como método de comparação ao nível de desempenho com a antena principal.

Ao longo deste processo foram simuladas e construídas várias antenas de teste com vista a integrar o circuito da *tag* final. Optou-se por não as apresentar nesta dissertação por serem incompatíveis com os objetivos propostos, contudo ressalvo a sua importância no processo de aprendizagem e produto final.

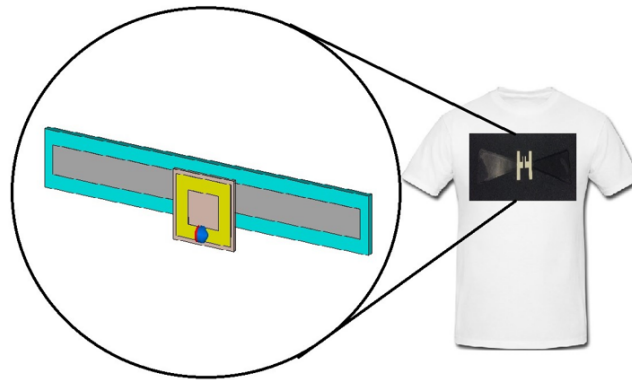


Figura 35: Projeto da *tag* incorporada em têxtil

4.1 Recursos utilizados

O material têxtil utilizado no projeto das *tags* RFID foi facultado pela Universidade da Beira Interior, juntamente com as características do tecido dielétrico e do tecido condutor, dados indispensáveis para as simulações.

Tabela 4: Características do material têxtil

Tecido dielétrico		Tecido condutor	
Permitividade (ε_r)	1.15	Condutividade (σ)	10 kS/m
Tangente de perdas ($\tan \delta$)	0.005	Espessura	0.08 mm
Espessura	2.8 mm		

Tabela 5: Características do material utilizado PCB

Substrato dielétrico (FR-4)		Substrato condutor (Cobre)	
Permitividade (ε_r)	4.4	Condutividade (σ)	5.8×10^7 S/m
Tangente de perdas ($\tan \delta$)	0.025	Espessura	0.035 mm
Espessura	1.6 mm		

A Universidade da Beira Interior procedeu igualmente ao fabrico das antenas simuladas em substrato têxtil, após envio do *layout* pretendido, dado que detém de uma máquina de corte a laser que oferece uma melhor precisão na construção das mesmas.

Para as diversas *tags* RFID desenvolvidas optou-se por utilizar o chip da Murata MAGICSTRAP® (LXMS31ACNA-011) por apresentar as melhores características para o pretendido mediante os outros chips disponíveis no instituto de telecomunicações (IT) da Universidade de Aveiro.

Este chip apresenta uma potência mínima de funcionamento de 8 dBm, exibindo a seguinte impedância de entrada a 866.6 MHz [73]:

$$Z_{in} = 25 - j200 \, \Omega \quad (21)$$

Com base nesta informação, as antenas foram projetadas para uma frequência de 868 MHz, apresentando uma impedância de entrada aos seus terminais de:

$$Z_a = Z_{in}^* = 25 + j200 \, \Omega \quad (22)$$

Deste modo, o valor de Z_a permite uma boa adaptação entre o chip e a antena, existindo máxima transferência de potência.

Na simulação das antenas desenvolvidas utilizou-se o CST, no qual não é possível definir impedâncias complexas. A solução passou por adicionar um porto de impedância real, juntamente com um condensador em série, possibilitando assim representar a parte imaginária.

Sabendo que o valor do condensador pode ser obtido pela seguinte equação:

$$C = \frac{1}{j2\pi f Z_c} \quad (23)$$

Utilizou-se um porto com impedância de 25Ω em série com um condensador de $0.91679 pF$ para representar a impedância complexa do chip.

Recorreu-se ao kit da ALIEN ALR-8800 RFID (figura 36) para testar o funcionamento das *tags* desenvolvidas, tendo sido previamente efetuada uma medição do espectro do *reader*.



Figura 36: Kit ALIEN ALR-8800 RFID [74]

Recorrendo ao cenário de teste ilustrado na figura seguinte, realizou-se em laboratório uma medição do espectro do *reader* para uma leitura (figura 38a) e múltiplas leituras (figura 38b). Recorreu-se a um atenuador de 40 dB para melhor visualizar o espectro.

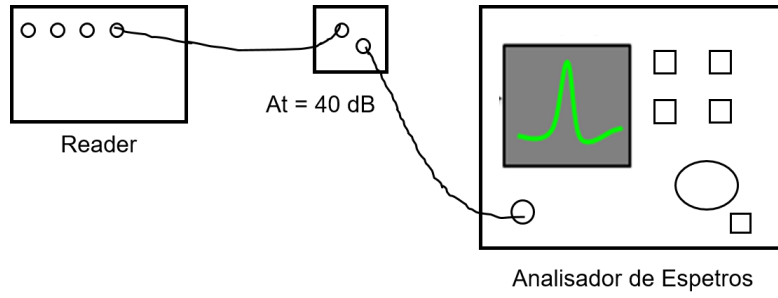


Figura 37: Cenário de teste

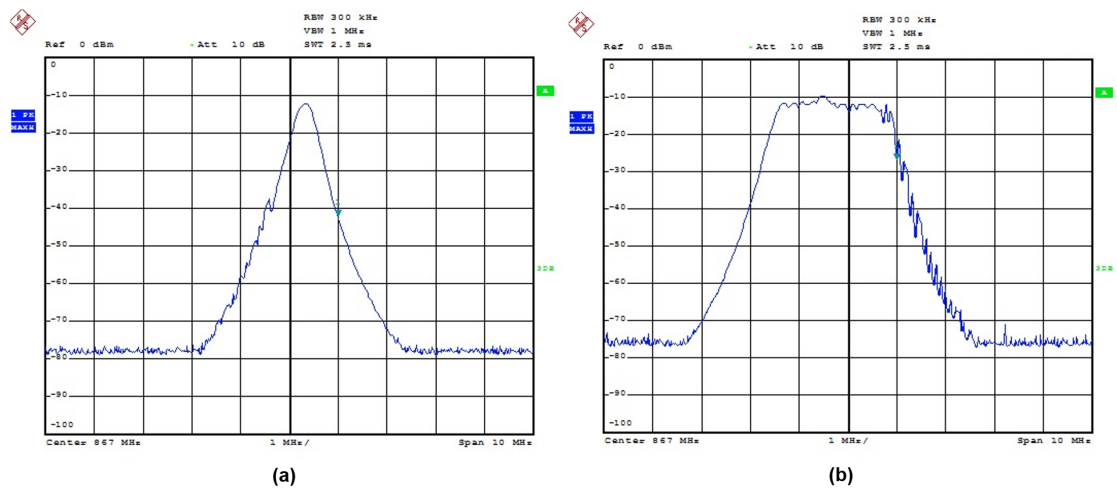


Figura 38: Espectro do *reader* para uma e múltiplas leituras

Pela análise do espectro do *reader* (figura 38), constatou-se que este estava a emitir a aproximadamente $-11 + 40 + 2 = 31$ dBm. Nesta aproximação, assumiu-se que as perdas nos cabos eram cerca de 2 dB. O *reader* encontrava-se a emitir uma potência máxima relativamente contínua entre 865.6 e 867.8 MHz (figura 38b), valores que confirmam os dados referenciados no *datasheet* do *reader* [74].

As antenas deste *reader* apresentam polarização circular, ao passo que as antenas produzidas têm polarização linear, sendo que este aspeto condiciona os resultados obtidos em termos de alcance de leitura, dado que o *reader* não detém de antenas apropriadas às *tags* desenvolvidas.

A medição do alcance de leitura das antenas procedeu-se de igual modo para as diversas antenas produzidas. De forma a se evitarem reflexões, tanto quanto possível, a medição foi efetuada no exterior do IT, num “espaço aberto”. Foi ainda tido em consideração o correto posicionamento das *tags*, de forma a salvaguardar que o seu máximo de radiação se encontrasse direcionado segundo as antenas do *reader*, sendo assim possível

a medição do alcance. A figura 39 ilustra o *setup* deste procedimento.



Figura 39: *Setup* da medição do alcance das antenas

4.2 Antena *loop* (PCB)

Empregando o CST e com intuito de depreender as vantagens da utilização do elemento parasítico em têxtil na construção da *tag* RFID proposta, caracterizou-se a antena *loop* em PCB separadamente deste elemento.

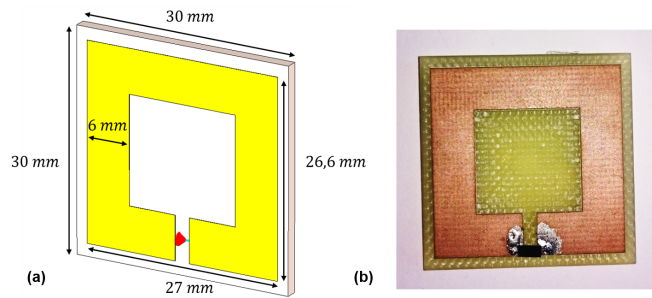


Figura 40: Antena *loop*: simulada (a) e produzida (b)

Na figura seguinte, encontra-se representado numa carta de Smith o parâmetro $|S_{11}|$ da antena.

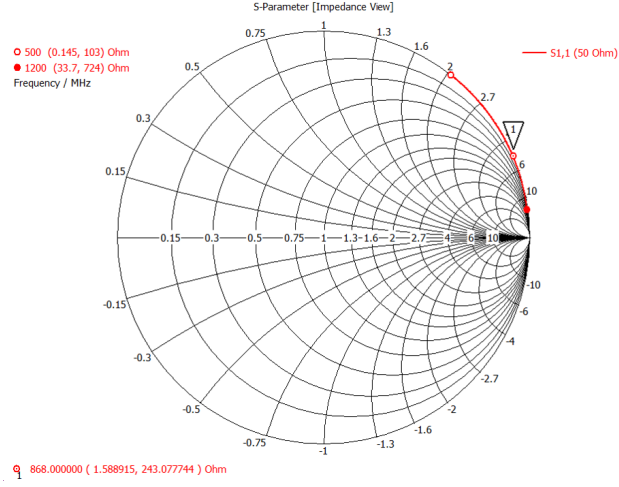


Figura 41: Parâmetro $|S_{11}|$

Na simulação desta antena, utilizou-se apenas o porto com uma impedância de entrada de referência de 50Ω . Deste modo, a partir dos gráficos representados na figura 42, é possível obter diretamente o valor da impedância de entrada da antena. Tratando-se de uma antena *loop*, que é essencialmente uma bobina, não é de admirar que possua uma impedância quase puramente indutiva, tal como se observa pela carta de Smith (figura 41).

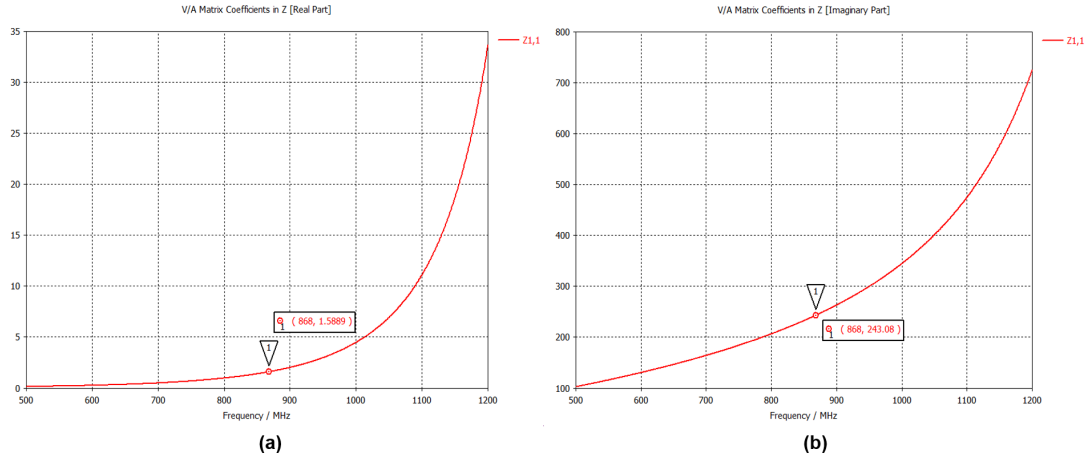


Figura 42: Impedância de entrada da antena: real (a) e imaginária (b)

Portanto, a impedância de entrada da antena é de $Z_a = 1.59 + j243.08 \Omega$, o que confirma a natureza indutiva deste tipo de antena. Nesta perspectiva, verificou-se que a impedância real é pequena, levando a uma eficiência de radiação baixa, como se pode observar pelo diagrama de radiação da diretividade desta antena em 3D e 2D (figura 43 e 44, respetivamente).

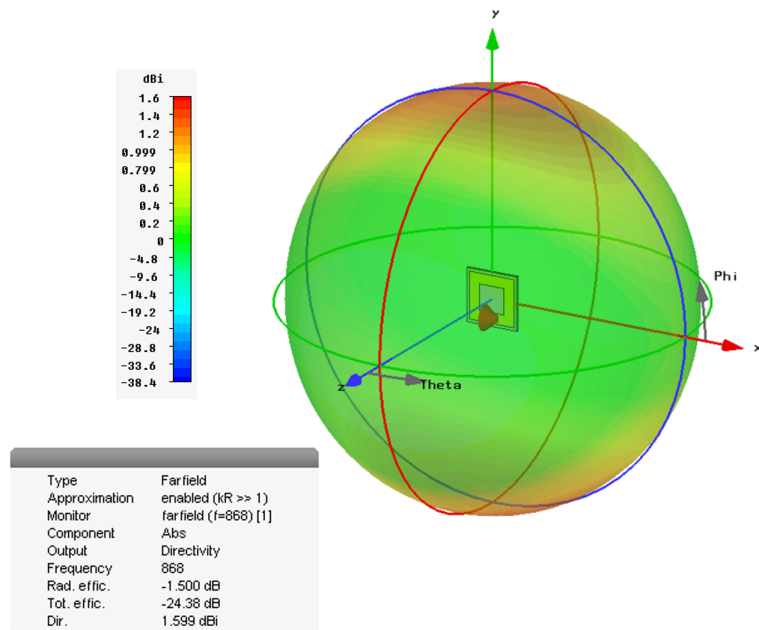


Figura 43: Diagrama de radiação 3D da diretividade da antena *loop*

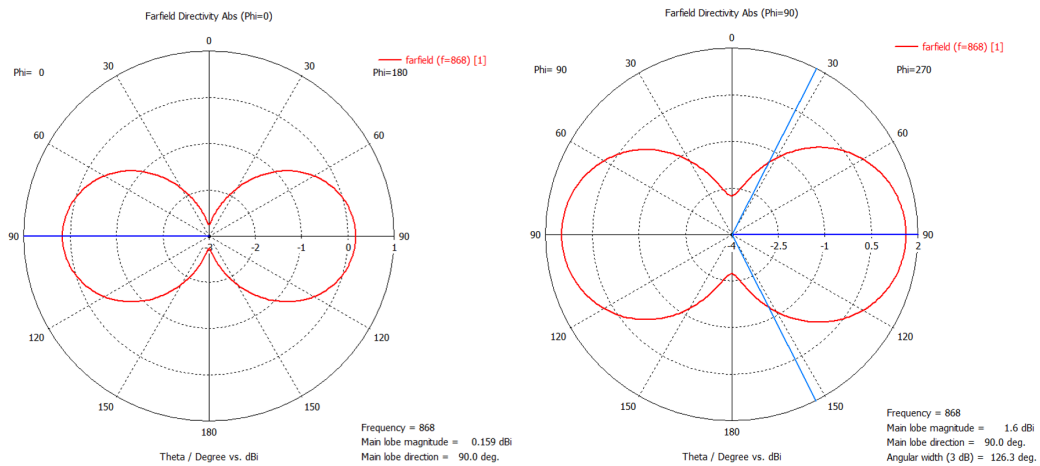


Figura 44: Diagramas de radiação 2D da diretividade da antena *loop*

Não são apresentados os diagramas de radiação do ganho da antena *loop*, pois se pretende somente observar como a antena radia, o que não era possível com este diagrama, dado que a antena não se encontra adaptada, sendo o ganho baixo. Tal como referido no capítulo anterior, esta antena apresenta um diagrama de radiação em tudo semelhante ao teoricamente esperado (figura 26), o qual apresenta um nulo no plano perpendicular à antena e com o seu máximo ao longo do plano do *loop*. A antena apresenta uma eficiência de radiação de cerca de 70%. Possui uma diretividade de cerca de 1.599 dBi, isto

porque a antena *loop* radia aproximadamente de igual forma em dois sentidos, ao passo que, nas antenas apresentadas de seguida, a presença do elemento parasítico altera as propriedades de radiação da mesma e redireciona as ondas de rádio para uma determinada zona preferencial, levando a que estas possuam uma maior diretividade.

Conforme esperado, a antena *loop* ao ser medida separadamente do elemento parasítico em têxtil não funcionou. Isto em tudo tem a ver com a adaptação da antena, dado que quando a antena *loop* é separada do elemento parasítico, a impedância de entrada altera-se por completo (comparação entre as figuras 54 e 42), deixando de estar adaptada ao chip (impedância de entrada da antena é totalmente diferente da impedância conjugada do chip).

4.3 Antena *loop* (PCB) acoplada com elemento parasítico (PCB)

A antena *loop* acoplada com um elemento parasítico, desenhada num mesmo substrato, neste caso em PCB, teve de ser dimensionada de modo a ser ressonante à frequência pretendida de 868 MHz. Como a escolha do chip se manteve inalterada, a impedância de entrada que a antena tem de ter aos seus terminais, continua a ser de $Z_a = 25 + j200$.

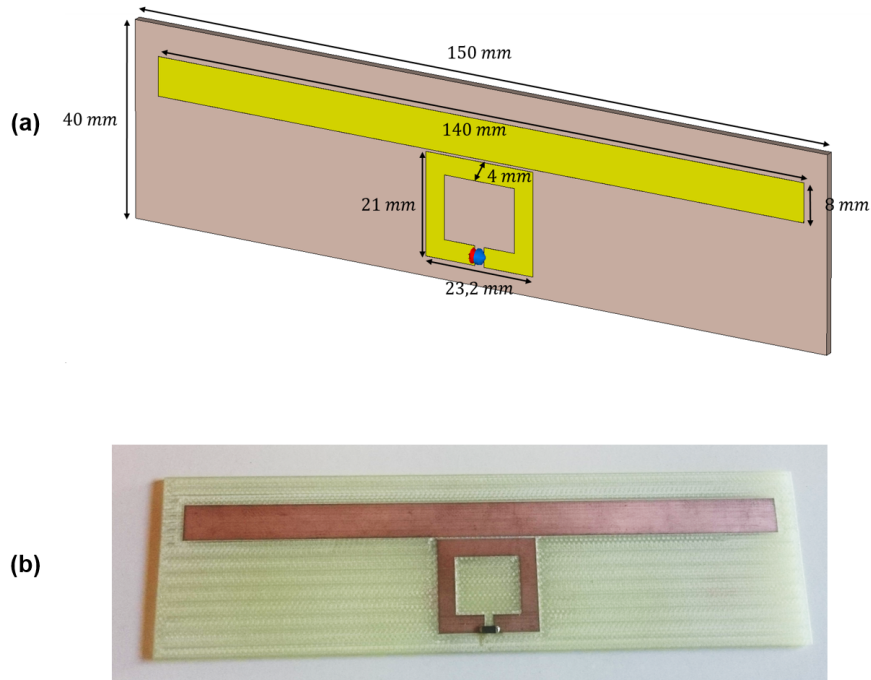


Figura 45: Antena *loop* acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (PCB): simulada (a) e produzida (b)

A figura seguinte representa o parâmetro $|S_{11}|$ da antena, obtido via simulação. Daqui

pode-se verificar que a antena se encontra adaptada à frequência pretendida de 868 MHz, com uma largura de banda muito favorável, rondando os 74.45 MHz.

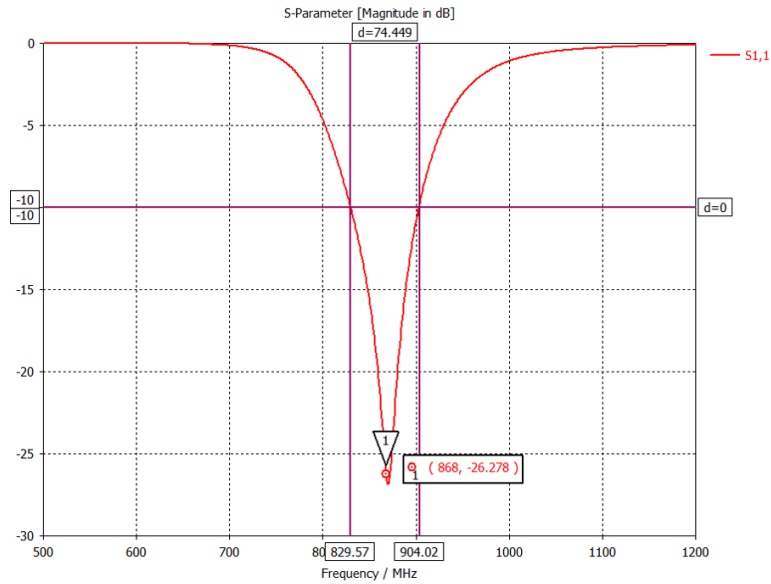


Figura 46: $|S_{11}|$ em função da frequência

A impedância de entrada da antena pode ser obtida por intermédio da figura 47, contudo estes resultados correspondem à impedância vista a partir do porto que incluem a impedância do condensador que está em série com o porto.

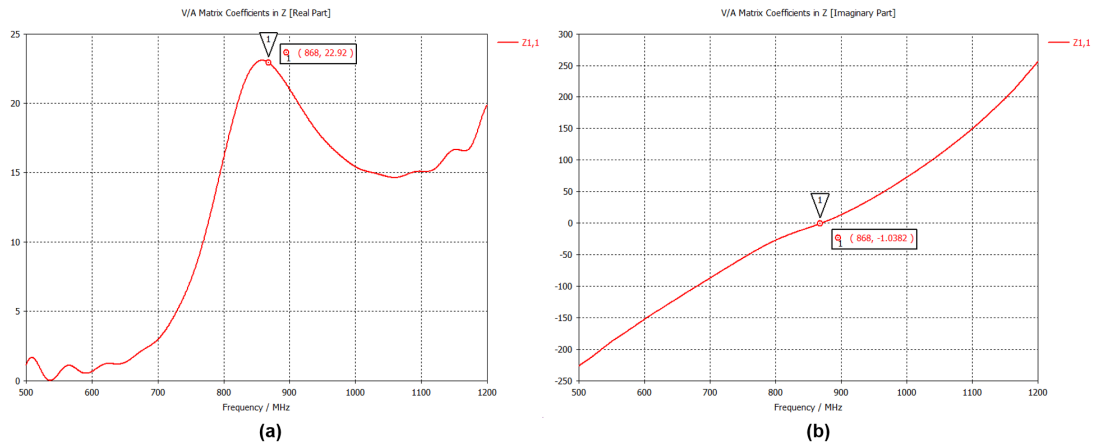


Figura 47: Impedância de entrada da antena com condensador em série: real (a) e imaginária (b)

Tendo em conta os gráficos anteriores, a impedância de entrada da antena foi calculada a partir da seguinte equação:

$$Z_a = Z_{simulado} - Z_c \quad (24)$$

Onde Z_a corresponde à impedância de entrada da antena, $Z_{simulado}$ à impedância vista a partir do porto e Z_c à impedância do condensador em série com o porto. Assim tem-se que:

$$Z_a = 22.92 - j1.0382 - (-j200) = 23.21 + j198.96 \, \Omega \quad (25)$$

Esta antena apresenta os seguintes diagramas de radiação em 3D e 2D (figuras 48 e 49, respetivamente).

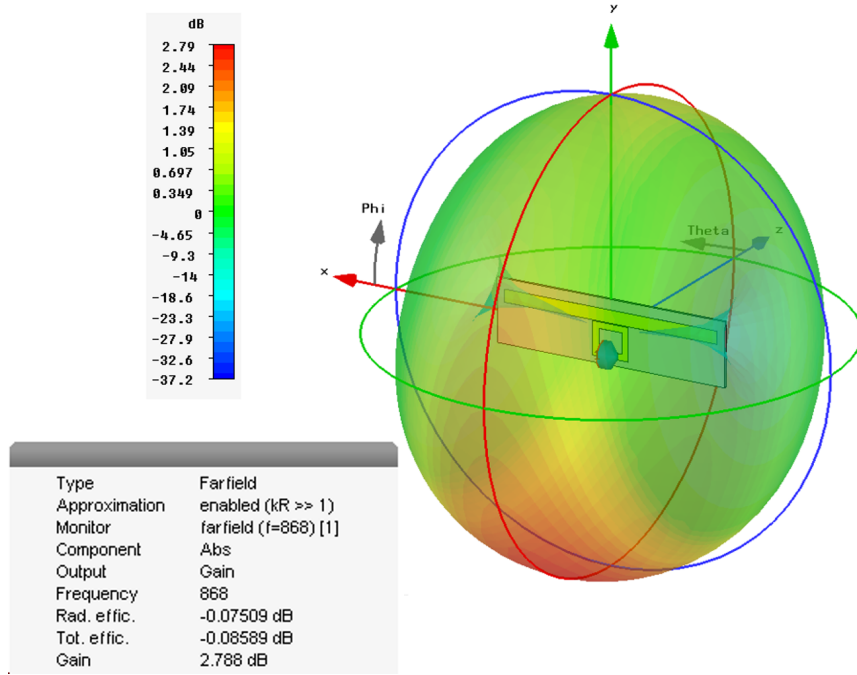


Figura 48: Diagrama de radiação 3D do ganho da antena *loop* acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (PCB)

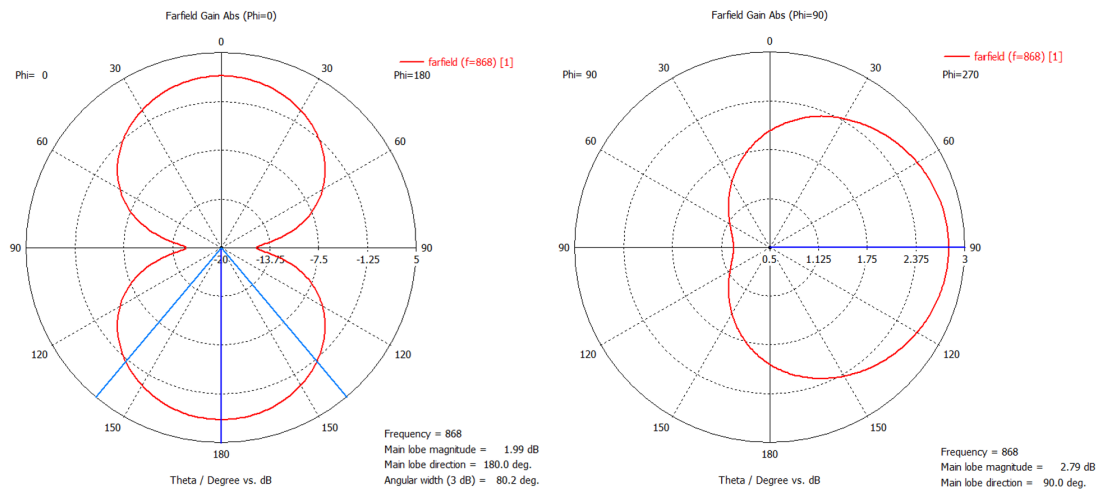


Figura 49: Diagrama de radiação 2D do ganho da antena *loop* acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (PCB)

O ganho que esta antena apresenta é de 2.788 dB, o que não é muito elevado, dado se tratar de uma antena com um diagrama de radiação que não é de todo diretivo. A antena apresenta uma eficiência de radiação de cerca de 98.3 %, o que é muito positivo, visto que as antenas *loop* são percecionadas como detentoras de uma baixa eficiência de radiação. A presença do elemento parasítico leva a que por acoplamento se aumente a resistência de radiação, resultando num aumento significativo da eficiência global do sistema.

O alcance em função da potência emitida pelo leitor pode ser observado na figura seguinte.

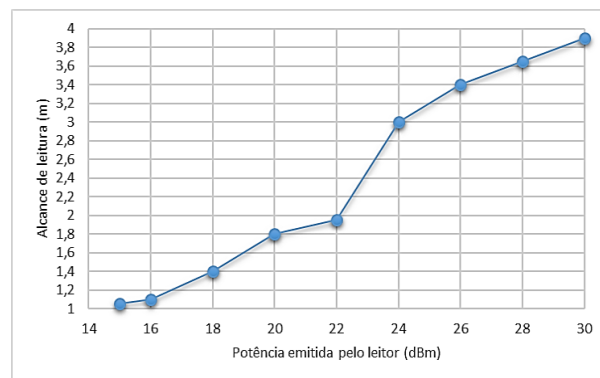


Figura 50: Alcance de leitura em função da potência do leitor

O alcance máximo de deteção registou-se para a máxima potência emitida pelo leitor, com um valor de 3.9 m. Conforme os resultados obtidos via simulação no CST, tal como

se pode observar melhor na secção 4.6, esperava-se obter alcances de leitura moderadamente superiores em relação à antena construída em substratos diferentes, dado que o ganho e a largura de banda eram maiores. Uma possível explicação para isto, prende-se com as características do substrato utilizado (FR-4). Sendo um dos substratos mais económicos, é provável que possa apresentar ligeiras variações da constante dielétrica, pois este varia com a frequência (figura 51). Estas variações da constante dielétrica alteram as propriedades da antena, nomeadamente a sua impedância de entrada. Com base nestes fatores, a antena poderá apresentar uma ligeira desadaptação, levando a que alcance distâncias de leitura abaixo do esperado.

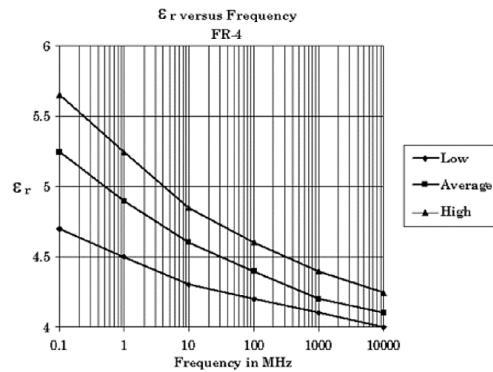


Figura 51: Constante dielétrica do substrato FR-4 em função da frequência [75]

É possível observar pela figura 51 que, mesmo para a mesma frequência, o valor da constante dielétrica do substrato FR-4 difere significativamente, apresentando três curvas que indicam o valor mais baixo, o médio e o máximo que a permitividade deste substrato costuma adotar.

4.4 Antena *loop* (PCB) acoplada com elemento parasítico (têxtil)

Empregando o CST, desenhou-se para 868 MHz uma antena *loop* (correspondente à da secção 4.2) em substrato FR-4 (PCB) acoplada com uma outra em têxtil (elemento parasítico). A figura 52 ilustra o projeto simulado, com as respetivas dimensões.

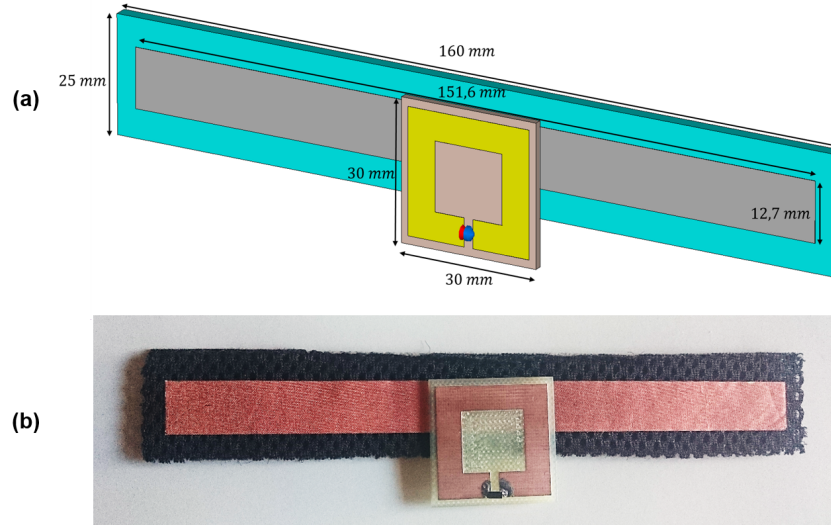


Figura 52: *Tag* RFID incorporada em têxtil: simulada (a) e produzida (b)

A antena apresenta dimensões, ao nível do material condutor, superiores ao da antena *loop* acoplada com elemento parasítico em PCB (*tag* anterior). Tal deve-se ao facto do substrato têxtil dielétrico apresentar um valor de permissividade ($\epsilon_r = 1.15$) inferior ao do substrato dielétrico FR-4 ($\epsilon_r = 4.4$), o que levou a uma ligeira ampliação desta antena, como se pode observar pela seguinte equação, onde λ corresponde ao comprimento de onda, λ_0 ao comprimento de onda no vácuo e ϵ_r à constante dielétrica relativa [76]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (26)$$

A utilização do elemento parasítico em têxtil acoplado com a antena *loop* em PCB teve como principal objetivo aumentar a eficiência de radiação do sistema (aumento da resistência de radiação) bem como apresentar aos terminais da antena *loop* a impedância conjugada do chip para a máxima transferência de energia.

Por outras palavras, a antena *loop* como é induzida magneticamente, apresenta uma grande limitação ao nível do alcance obtido, dado que o campo magnético decai com o cubo da distância. Sendo assim, esta funciona como um circuito fechado, onde no ponto de junção da antena tem-se o chip RFID. O elemento parasítico faz uso do campo elétrico, onde na presença de ondas de rádio faz os eletrões se moverem para cima e para baixo, gerando uma corrente ao longo deste. Por sua vez, esta corrente gera um campo magnético em torno do elemento parasítico, induzindo a antena *loop*. Deste modo, com a presença do elemento parasítico é possível aumentar o alcance de leitura da *tag*. Este elemento também altera as propriedades de radiação da antena, em que as ondas de rádio são direcionadas para uma zona preferencial, aumentando assim a diretividade e consequente ganho do sistema.

O parâmetro $|S_{11}|$ da antena obtido via simulação pode ser observado na figura 53. Daqui pode-se verificar que a largura de banda da antena é de 63.746 MHz e que à frequência pretendida a antena encontra-se bem adaptada.

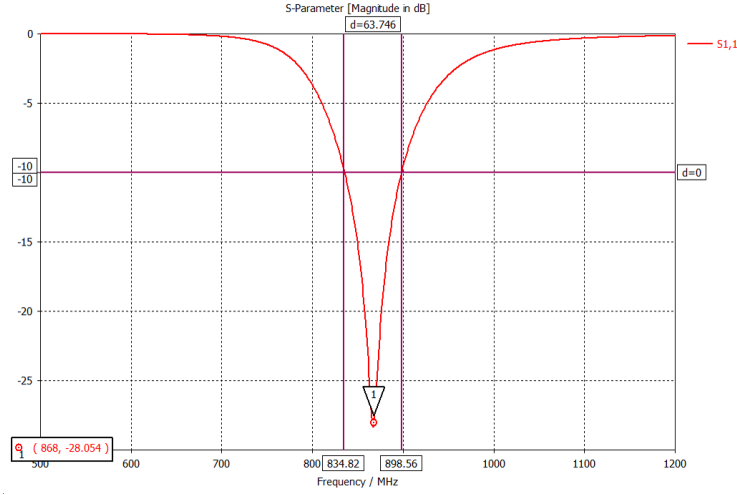


Figura 53: $|S_{11}|$ em função da frequência

A impedância de entrada da antena foi calculada com base na equação 24 e nos valores obtidos pelos gráficos seguintes (figura 54), resultando em $Z_a = 23.21 + j200.64 \Omega$ a 868 MHz. Tal como se pode observar, com a presença do elemento parasítico já conseguimos ter esta *tag* adaptada, em que a impedância de entrada deixa de ser quase puramente indutiva (figura 41) e passa a ter a impedância conjugada do chip.

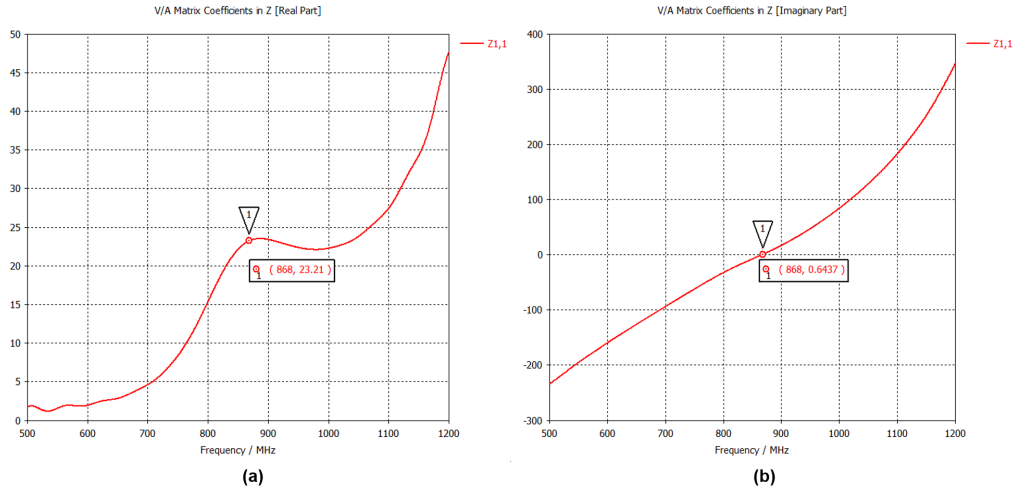


Figura 54: Impedância de entrada da antena com condensador em série: real (a) e imaginária (b)

O valor da impedância de entrada da antena desenvolvida corresponde aproximadamente à impedância conjugada do chip, o que reforça a evidência que a antena se encontra adaptada ao chip.

A antena desenvolvida apresenta os seguintes diagramas de radiação em 3D e 2D (figuras 55 e 56, respetivamente).

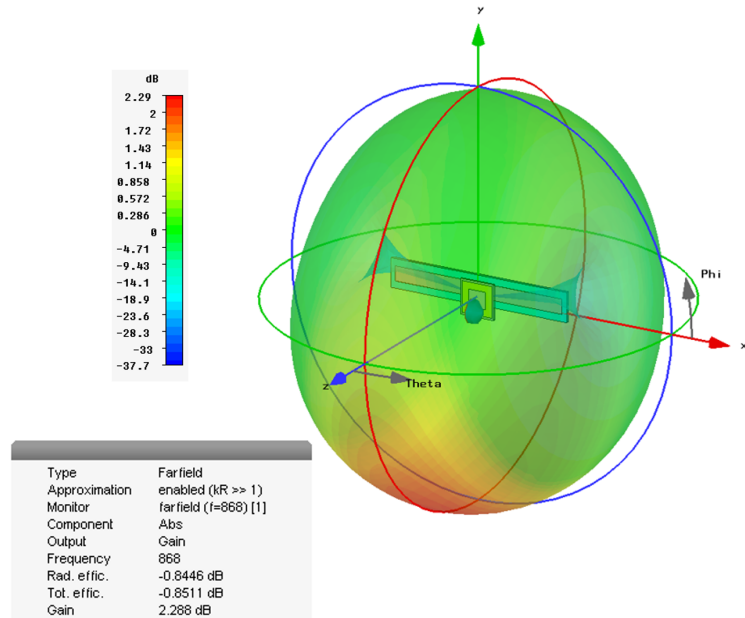


Figura 55: Diagrama de radiação 3D do ganho da antena *loop* com elemento parasítico em têxtil

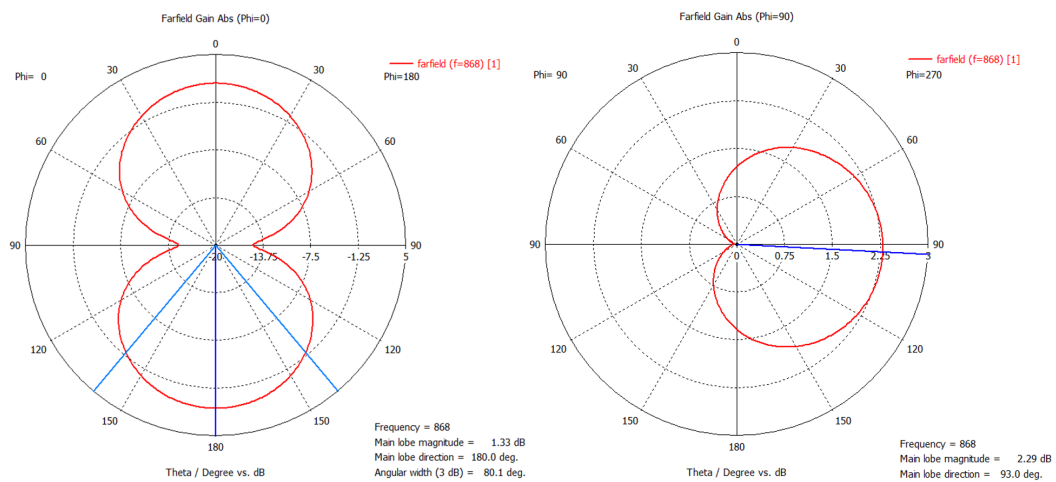


Figura 56: Diagramas de radiação 2D do ganho da antena *loop* com elemento parasítico em têxtil

Esta antena exibe um ganho (2.288 dB) inferior comparativamente à antena *loop* acoplada com elemento parasítico em PCB (*tag* anterior). O têxtil condutor possui valores de condutividade muito inferiores ao do cobre, o que se traduz numa queda da eficiência de radiação, visto que as perdas serão maiores. Isto pode ser observado na figura 55, onde se obteve um valor de 82 % de eficiência de radiação, sendo este valor também superior ao obtido apenas com o loop na secção 4.2. O elemento parasítico influencia o diagrama de radiação, na medida em que funciona como um refletor, alterando as propriedades de radiação da antena e redirecionando as ondas de rádio numa determinada direção.

O alcance de leitura em função da potência emitida pelo leitor, obtido por meio das medições realizadas, pode ser observado na figura seguinte.

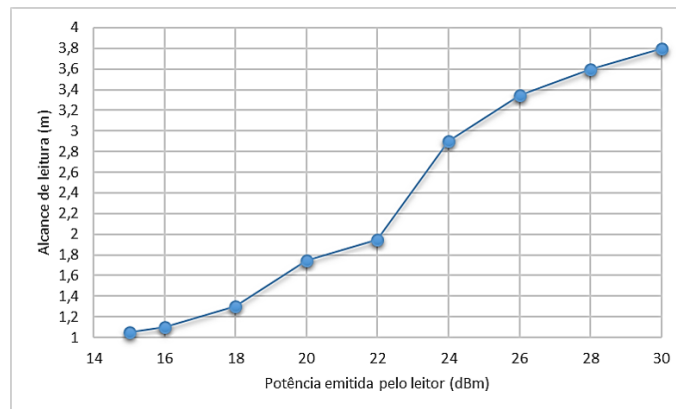


Figura 57: Alcance de leitura em função da potência emitida pelo leitor

Tal como esperado, o alcance de leitura aumenta à medida que a potência emitida pelo leitor aumenta. Os valores registados obviamente não são muito precisos, dado que é difícil localizar o ponto exato onde a *tag* deixa de ser detetada, isto porque é complicado manter sempre a mesma orientação em relação às antenas do leitor.

Consegue-se detetar a *tag* RFID desenvolvida a uma distância máxima de 3,8 m. Ressalvo novamente que o resultado obtido ao nível do alcance poderia ter sido superior, se não fosse o facto da antena da *tag* e do leitor possuírem polarizações diferentes.

4.5 Antena *loop* (têxtil) acoplada com elemento parasítico (têxtil)

A antena *loop* acoplada com um elemento parasítico, redesenhada num mesmo substrato, agora em têxtil, teve de ser redimensionada de modo a ser ressonante à frequência pretendida de 868 MHz. Mais uma vez, a escolha do chip manteve-se inalterada, pelo que a impedância de entrada da antena vista a partir dos seus terminais continua a ser de $Z_a = 25 + j200$.

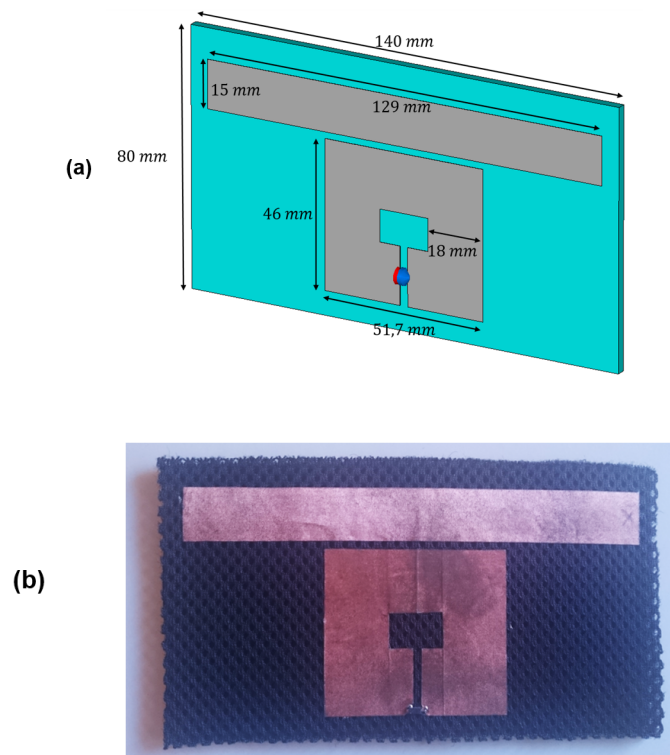


Figura 58: Antena *loop* acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (têxtil): simulada (a) e produzida (b)

A antena apresenta dimensões superiores, ao nível do material condutor, comparativamente às antenas desenvolvidas anteriormente. Esta ampliação dimensional relaciona-se com o facto de o substrato dielétrico têxtil possuir um valor de permitividade mais baixo, dado que o comprimento de onda de uma onda eletromagnética num meio dielétrico é inversamente proporcional à raiz quadrada da constante dielétrica relativa (equação 26).

A figura seguinte representa o parâmetro $|S_{11}|$ da antena, obtido em simulação. Daqui pode-se observar que a antena encontra-se adaptada à frequência pretendida de 868 MHz, com uma largura de banda de cerca de 47,15 MHz, exibindo assim a menor largura de banda em comparação com as antenas previamente estudadas.

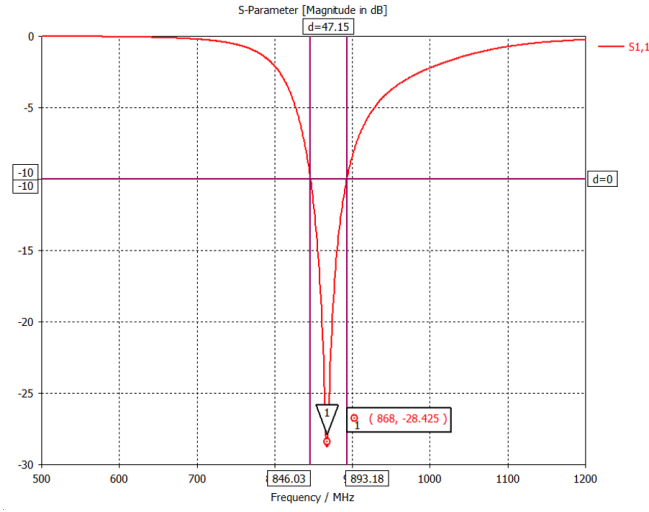


Figura 59: $|S_{11}|$ em função da frequência

A impedância de entrada da antena foi calculada com base na equação 24 e nos valores obtidos pelos gráficos da figura 60, dos quais se retira que $Z_a = 23.49 + j201.036 \Omega$ a 868 MHz.

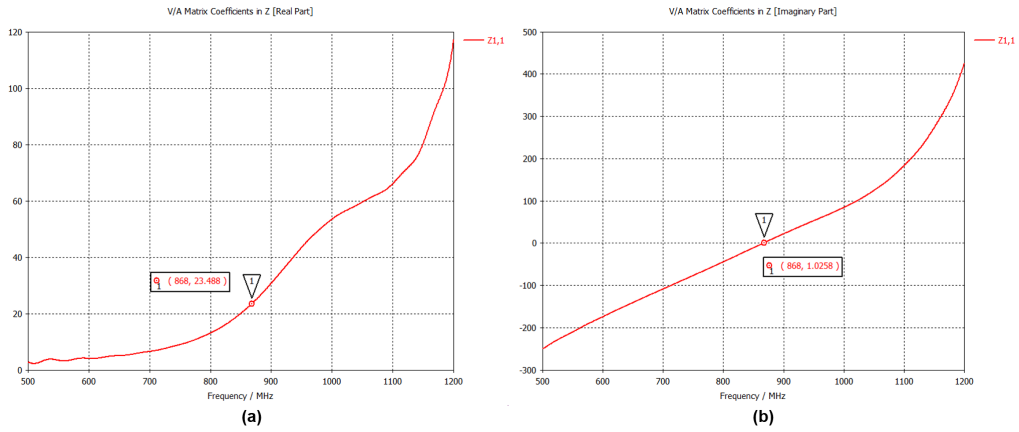


Figura 60: Impedância de entrada da antena com condensador em série: real (a) e imaginária (b)

Seguem-se os diagramas de radiação em 3D e 2D mais relevantes da antena em questão, obtidos via simulação.

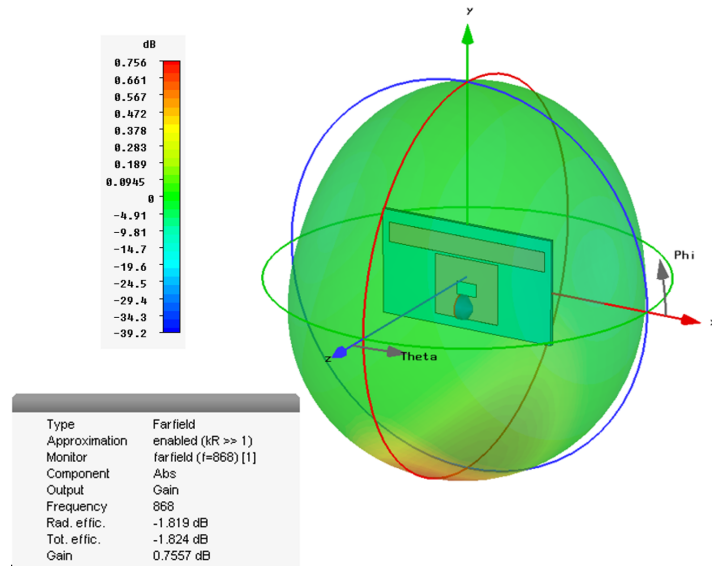


Figura 61: Diagrama de radiação 3D do ganho da antena *loop* acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (têxtil)

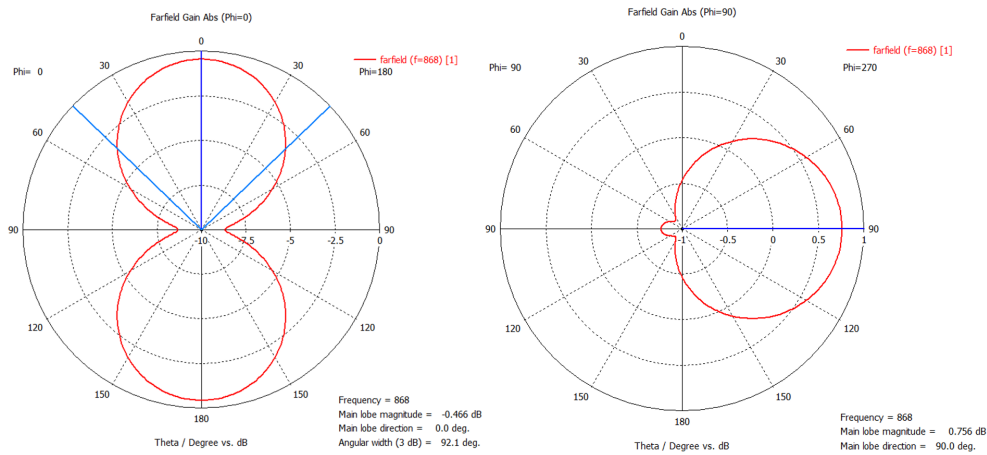


Figura 62: Diagrama de radiação 2D do ganho da antena *loop* acoplada com elemento parasítico no mesmo substrato (têxtil)

Esta antena exibe um ganho (0.7557 dB) inferior comparativamente à antena *loop* acoplada com elemento parasítico em substratos diferentes. Como a antena se encontra dimensionada somente em substrato têxtil, e tendo em conta que o substrato condutor têxtil utilizado apresenta uma condutividade inferior ao cobre, é de esperar que apresente uma eficiência de radiação naturalmente mais baixa (65,8%) em relação às antenas anteriormente estudadas. Mais uma vez, o elemento parasítico influencia o diagrama de radiação, operando como refletor, que altera as propriedades de radiação da antena e

redireciona as ondas de rádio numa dada direção.

O alcance em função da potência emitida pelo leitor pode ser observado na figura seguinte.

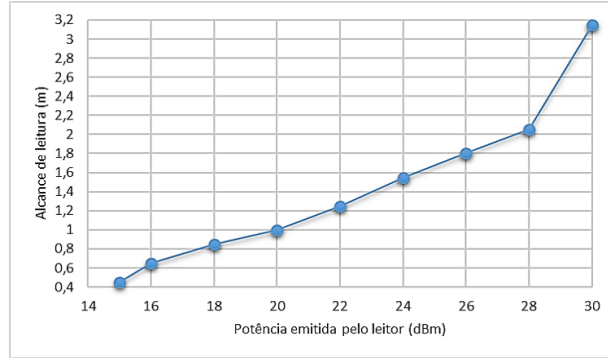


Figura 63: Alcance de leitura em função da potência do leitor

Como esperado, o alcance de leitura aumenta à medida que se eleva a potência emitida pelo leitor. Os valores obtidos são inferiores às outras duas antenas desenvolvidas. Estes resultados já eram *a priori* esperados, dado que esta antena apresenta um ganho e eficiência de radiação inferiores comparativamente às outras duas.

4.6 Comparações

Para uma melhor visualização, comparação e análise dos resultados obtidos das diversas *tags* construídas, decidiu-se introduzir este ponto. Segue-se assim uma série de figuras comparando-as em termos de largura de banda, ganho, eficiência de radiação e alcance de leitura.

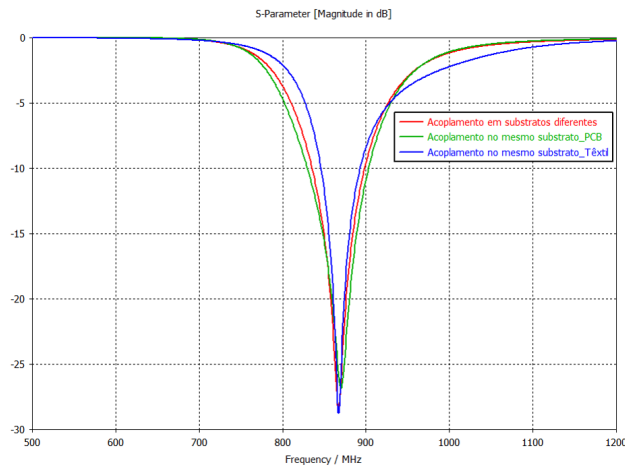


Figura 64: Parâmetro $|S_{11}|$ em função da frequência das várias *tags*

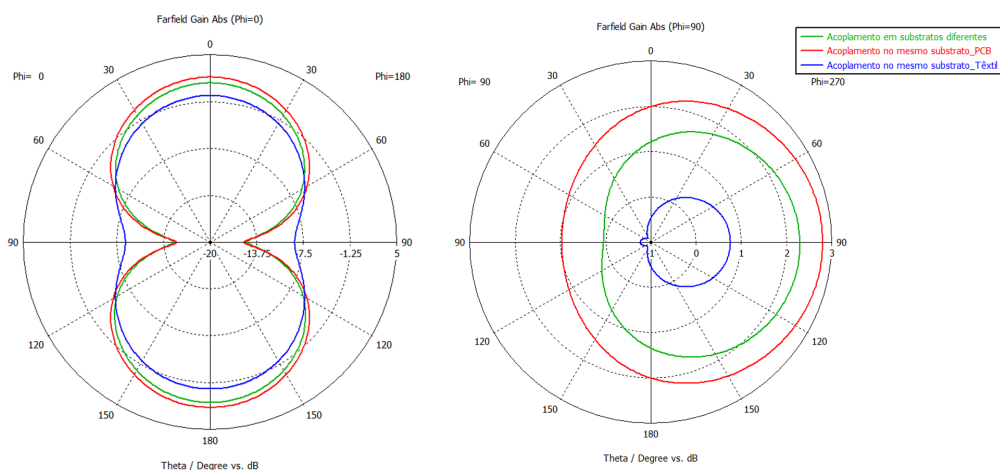


Figura 65: Diagrama de radiação 2D do ganho das várias *tags*

Pela análise das figuras 64 e 65, comprova-se que a antena que apresenta, à partida, melhores resultados em termos de largura de banda, ganho e eficiência de radiação é a *tag* desenvolvida no mesmo substrato PCB.

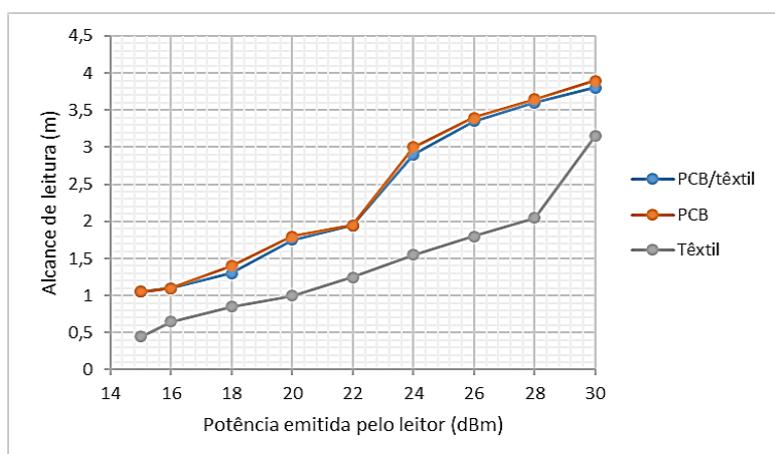


Figura 66: Alcance de em função da potência do leitor das várias *tags*

Relativamente ao alcance de leitura, verificou-se que a antena construída em diferentes substratos ostentou resultados muito semelhantes à antena desenvolvida somente em substrato FR-4. Teoricamente, esperava-se obter valores superiores desta última, contudo isso não se observou. Como já explicado anteriormente, esta situação provavelmente relaciona-se com as variações na constante dielétrica que o substrato FR-4 manifesta, que alteram as propriedades da antena, tais como a impedância de entrada, levando a uma ligeira desadaptação do chip que, por sua vez, traduz-se em distâncias de leitura abaixo do esperado.

Um aspeto positivo a ter em conta é que, de acordo com a figura 66, o uso de apenas

uma antena *loop* em PCB acoplada com elemento parasítico em têxtil tem resultados equivalentes à *tag* que apresenta o acoplamento no mesmo substrato. Naturalmente que este último é de maior tamanho, no que se refere apenas às dimensões do substrato PCB. Consegue-se aproveitar o facto de utilizar este elemento parasítico em têxtil, sendo apenas necessário a colocação de uma *tag* de reduzidas dimensões sobre este, onde por acoplamento se obtém alcances de leitura favoráveis para a sua viabilidade como sistema de identificação. Como é óbvio, não se pretende colocar um objeto de grandes dimensões numa camisola, dado que se tornava incomodativo para a pessoa. Portanto, pretende-se garantir que o funcionamento não seja afetado pela dimensão da *tag*, isto é, mesmo com reduzidas dimensões se consiga resultados equivalentes ou até superiores.

A antena em têxtil foi a que ostentou maiores dimensões, dado que o substrato dielétrico possui uma constante dielétrica inferior ao FR-4. Esta, tal como esperado, apresentou os piores resultados ao nível do alcance obtido, porque tanto a eficiência do sistema como o ganho, apresentam valores inferiores às outras duas antenas desenvolvidas.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Com o intuito de estudar a aplicabilidade da tecnologia RFID em têxtil, desenvolveu-se uma *tag* RFID apta a ser incorporada em substrato têxtil para fins de identificação, com o desafio de desenvolvê-la tão pequena quanto possível, salvaguardando distâncias de leitura favoráveis para uma utilização vantajosa.

Inicialmente realizou-se uma abordagem geral ao estado da arte da tecnologia RFID, englobando a sua evolução histórica, caracterização do sistema e seus elementos, princípios de funcionamento e principais standards, com vista a um estudo preciso sobre o universo desta tecnologia.

De seguida, dedicou-se ao estudo detalhado de antenas, tido como fundamental para o projeto de construção da *tag* RFID pretendida, dado que o conhecimento dos diversos aspetos que influenciam as antenas possibilitou o correto dimensionamento e adaptação da antena ao meio desejado (têxtil). Considerou-se as antenas *loop* eletricamente pequenas as mais interessantes, no que toca à sua utilização por acoplamento, uma vez que são mais sensíveis ao campo magnético. Assim, procurando responder ao desafio de desenvolver uma *tag* de reduzidas dimensões, decidiu-se colocar o outro elemento acoplador no substrato têxtil. Este último adotou a forma de um dipolo, mas sem ser alimentado ao centro, tal como ocorre nas antenas convencionais deste tipo. Portanto, este elemento parasítico fará uso do campo elétrico proveniente das ondas eletromagnéticas, gerando uma corrente ao longo deste. Esta corrente gera um campo magnético em sua volta induzindo a antena *loop*, oferecendo assim um aumento do alcance de leitura da *tag*.

Paralelamente à *tag* RFID incorporada em têxtil, decidiu-se desenvolver outras duas *tags* para servirem como método de comparação, em termos de distância de leitura e dimensão, com a primeira desenvolvida. Respeitou-se a ideologia da *tag* anterior, contudo o acoplamento passou agora a ser feito no mesmo substrato, surgindo assim uma *tag* apenas construída em substrato FR-4 e outra somente produzida em substrato têxtil.

Para as diversas *tags* RFID desenvolvidas optou-se por utilizar o chip da Murata MAGICSTRAP® (LXMS31ACNA-011), compatível com o protocolo ISO 18000-6C, por

apresentar as melhores características para o pretendido mediante os outros chips disponíveis no IT da Universidade de Aveiro.

No sentido de se comprovar o correto funcionamento do sistema, foram realizadas diversas simulações e, por conseguinte, realizados os respetivos testes laboratoriais.

Recorrendo ao kit da ALIEN ALR-8800 RFID para as medições da distância de leitura das várias *tags* desenvolvidas, verificou-se que o alcance aumentava à medida que a potência emitida pelo leitor era ampliada. Os valores registados obviamente não foram muito precisos, dado que é difícil localizar o ponto exato onde a *tag* deixa de ser detetada, isto porque é complicado manter sempre a mesma orientação em relação às antenas do leitor. Outro aspeto a ter em conta é que os valores obtidos poderiam ter sido superiores se não fosse o facto das antenas das *tags* construídas e as antenas do leitor apresentarem polarizações distintas.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, conseguindo-se desenvolver uma *tag* RFID incorporada em têxtil passível de ser detetada a 3,8 m. Relativamente às outras, apresentou resultados semelhantes à *tag* construída em substrato FR-4 (alcance máximo de 3,9 m) e superiores à *tag* produzida em substrato têxtil (alcance máximo de 3,15 m). Em matéria de dimensões, a *tag* principal apresenta cerca de 30×30 mm, que foi o tamanho mínimo que se conseguiu atingir, todavia, considera-se ser passível de melhoria.

Em suma, conseguiu-se chegar a uma solução final viável, uma *tag* RFID incorporada em têxtil, capaz de ser utilizada como sistema de identificação.

5.2 Trabalho futuro

De maneira a criar um produto comercializável, a *tag* deveria apresentar um diagrama de radiação direcional, ou seja, um diagrama de radiação frontal ao plano da *tag*, diminuindo a relação frente-costas. A *tag* desenvolvida não teve isto em consideração, contudo ressalvo a sua importância para futuros trabalhos, dado que se a pessoa utilizar uma camisola integrada com tecnologia RFID não se pretende enviar radiação para dentro desta. Da mesma forma, o tamanho da *tag* incorporada em têxtil necessita de ser mais pequeno ao conseguido, possivelmente através do uso de outras configurações de antenas ou até pela utilização de malhas de adaptação.

Seria também interessante acrescentar outras funcionalidades para além da identificação, onde a *tag* em vez de enviar somente o seu ID, poderia por exemplo enviar também informações do produto têxtil onde estava inserida.

Outro aspeto a desenvolver seria a construção de uma *tag* com polarização circular, de forma a igualar a polarização das antenas do leitor, para que a transferência de potência entre o emissor e o recetor seja máxima.

Bibliografia

- [1] M.A.S. Serrão “Avaliação para o desenvolvimento de competências de liderança e inovação numa empresa de TI (estudo experimental)”, Dissertação de mestrado, FPCE-UL, UL, Lisboa, PT, 2009
- [2] Traceability in manufacturing: RFID and barcode technology Online em <http://www.ee.co.za/article/traceability-in-manufacturing-rfid-and-barcode-technology.html>. Consultado em Setembro 2016.
- [3] J.M.C. Marques “Análise dos fatores que influenciam a eficiência da tecnologia RFID aplicada a sistemas de produção”, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, BR, 2012
- [4] Indústria Têxtil e do Vestuário: Roadmap para a inovação 2012 » 2020 Online em http://www.citeve.pt/artigo/estrategia_roadmapping. Consultado em Setembro 2016.
- [5] P.B. Franco “Um estudo para o desenvolvimento de peças de vestuário com sensores têxteis incorporados com a função de prevenir má postura corporal”, Dissertação de mestrado, DCTT, UBI, Covilhã, PT, 2013
- [6] RFID Forecasts, Players and Opportunities 2016-2026 Online em <http://www.idtechex.com/research/reports/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2016-2026-000451.asp>. Consultado em Setembro 2016.
- [7] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. Chichester, UK: Wiley, 2003
- [8] H.M.C. Gomes “Construção de um sistema de RFID com fins de localização especiais”, Dissertação de mestrado, DETI, UA, Aveiro, PT, 2007
- [9] N.C. Karmakar, *Handbook of Smart Antennas for RFID Systems*. Hoboken, USA: Wiley, 2010
- [10] Análise da Linha de Produção e Estudo da Automação de Processos-PE10 Online em <http://paginas.fe.up.pt/~ee95203/rfid.htm>. Consultado em Setembro 2016.

- [11] H. Groß “Implementation of a Low-Resource Authentication Device”, Dissertação de mestrado, IAIK, GUT, Áustria, AT, 2013
- [12] RFID Journal. The History of RFID Technology. RFID Journal, 2005. Online em <http://www.rfidjournal.com/articles/view?1338/2>. Consultado em Setembro 2016.
- [13] Jeremy Landt "Los Alamos National Laboratory", 0278-6648/05/© 2005 IEEE
- [14] A. Rida, L. Yang e M. Tentzeris, *RFID-Enabled Sensor Design and Applications*. Norwood, USA: Artech House, 2010
- [15] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. Chichester, UK: Wiley, 2010
- [16] Funcionamento da RFID Online em <http://saladaautomacao.com.br/funcionamento-da-rfid/>. Consultado em Julho 2016.
- [17] Explore the World of Wireless Technology Online em <http://www.wireless-technology-advisor.com/>. Consultado em Setembro 2016.
- [18] Scanning Away Food Waste? How RFID Tags Could Minimize Retail Food Waste by 20 Percent Online em <http://www.labtestingmatters.org/no-more-specimen-hide-and-seek-radio-frequency-id-technology-rfid/>. Consultado em Outubro 2016.
- [19] Etiquettes rfid Online em <http://www.hellopro.fr/etiquettes-rfid-1002112-fr-1-feuille.html>. Consultado em Outubro 2016.
- [20] RFID Journal. Glossary of RFID Terms. Online em <http://www.rfidjournal.com/site/glossary-of-terms>. Consultado em Julho 2016.
- [21] A.J.S. Boaventura “Leitor/Gravador RFID – Banda HF (13.56 MHz)”, Dissertação de mestrado, DETI, UA, Aveiro, PT, 2009
- [22] A.M.A. Duarte “Sensores Passivos em Suporte de Papel”, Dissertação de mestrado, DETI, UA, Aveiro, PT, 2013
- [23] Active RFID Tags Online em <http://www.rfidsolutionsonline.com/doc/active-rfid-tags-0001>. Consultado em Setembro 2016.
- [24] 2.45GHz Active RFID Wristband Tag with IR Temperature Sensor Online em http://syristw.en.ec21.com/2.45GHz_Active_RFID_Wristband_Tag--2620530_6688345.html. Consultado em Setembro 2016.
- [25] S. Lahiri, *RFID Sourcebook*. Upper Saddle River, USA: IBM Press, 2006

- [26] P.I. Prata “Sistemas de Localização para Ambientes Interiores baseados em RFID”, Dissertação de mestrado, DETI, UA, Aveiro, PT, 2008
- [27] R.L. Magueta “Sensores Passivos em Suporte de Cortiça”, Dissertação de mestrado, DETI, UA, Aveiro, PT, 2013
- [28] Electronic article surveillance systems, anti-theft system Online em <http://www.supermarketsecurity.net/industrynews/show/627.html>. Consultado em Julho 2016.
- [29] *Sistemas de Rádio: Fundamental Concepts of Radio Systems. Aulas técnicas, Universidade de Aveiro, 2015*
- [30] J.R.B. Santos “Leitor RFID para a gama UHF baseado em Software-Defined Radio”, Dissertação de mestrado, DETI, UA, Aveiro, PT, 2014
- [31] E. Zeisel e R. Sabella, *RFID+ Certification Exam Cram*. Indianapolis, USA: Que Certification, 2006
- [32] RFID "Identificação por frequência de rádio" Online em <http://www.activa-id.com.br/o-que-e-rfid#.V6s0CDsrKhc>. Consultado em Agosto 2016.
- [33] Tutorial: Radio Basics for UHF RFID–Part IV Online em http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1276506. Consultado em Agosto 2016.
- [34] M. Cavaco e M. Benedet, “Medição de temperatura em pontos quentes de subestações utilizando sensores passivos e ativos”, vol. 15, no. 1, pp. 13– 22, 2011.
- [35] D.P.T. Macário “Utilização de Dispositivos de Onda Superficial Como Sensores e Identificadores”, Dissertação de mestrado, DETI, UA, Aveiro, PT, 2007
- [36] RFID and Temperature Sensing Utilizing SAW Technology Online em <http://www.rfsaw.com/Pages/default.aspx>. Consultado em Agosto 2016.
- [37] A.S. Oliveira e M.F. Pereira “Estudo da tecnologia de identificação por rádiofrequência - RFID”, Projeto de Graduação, ENE, UnB, Brasília, BR, 2006
- [38] About ISO Online em <http://www.iso.org/iso/home/about.htm>. Consultado em Agosto 2016.
- [39] Y. Huang e K. Boyle, *Antennas: From Theory to Practice*. Chichester, UK: Wiley, 2008
- [40] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Hoboken, USA: Wiley, 2005
- [41] Diagrama de Radiação Online em <http://paginas.fe.up.pt/~ee99051/pstfc/diagrama.html>. Consultado em Setembro 2016.

- [42] Antenna Fundamentals Online em <http://www.mtiwe.com/?CategoryID=353&ArticleID=163>. Consultado em Outubro 2016.
- [43] Something about antennas and gain Online em <https://hamgear.wordpress.com/2012/07/17/something-about-antennas-and-gain/>. Consultado em Setembro 2016.
- [44] Parâmetros e Propriedades Fundamentais de uma Antena Online em http://www.feng.pucrs.br/~decastro/pdf/A_C3.pdf. Consultado em Setembro 2016.
- [45] Antenas Online em <http://fpvportugal.com/forum/viewtopic.php?t=1803>. Consultado em Setembro 2016.
- [46] S. A. Schelkunoff e H.T. Friis, *Antennas: Theory and Practice*. New York, USA: Wiley, 1952
- [47] *Antennas: A brief introduction. Aulas técnicas, Universidade de Aveiro, 2016*
- [48] First Circularly Polarized Light Detector On A Silicon Chip Online em <http://reliawire.com/circularly-polarized-light-chip/>. Consultado em Outubro 2016.
- [49] What's The Difference Between A Dipole And A Ground Plane Antenna? Online em <http://electronicdesign.com/wireless/what-s-difference-between-dipole-and-ground-plane-antenna>. Consultado em Setembro 2016.
- [50] Telecomunicaciones Online em <http://www.proteccioncivil.org/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm036.htm>. Consultado em Setembro 2016.
- [51] Helical Antenna Design Calculator Online em <http://www.everythingrf.com/rf-calculators/helical-antenna-design>. Consultado em Setembro 2016.
- [52] Antenna Introduction / Basics Online em <http://certifytech.tripod.com/references/electronic/electronics/antenna.html>. Consultado em Setembro 2016.
- [53] Antenna Patterns Online em <http://www.rfcafe.com/references/electrical/antenna-patterns.htm>. Consultado em Setembro 2016.
- [54] AM Loop Antennas Online em <http://earmark.net/gesr/loop/>. Consultado em Setembro 2016.
- [55] Loop Antennas Online em <http://www.antentop.org/004/files/tr004.pdf>. Consultado em Setembro 2016.
- [56] J. J. Carr, *Joe Carr's Receiving Antenna Handbook*. Solana Beach, USA: HighText, 1993

- [57] “Design of Printed Trace Differential Loop Antennas”, Silicon Laboratories Application Note: AN639. Online em <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN639.pdf>. Consultado em Setembro 2016.
- [58] “Antenna selection guidelines”, STMicroelectronics Application Note: AN4190. Online em http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/82/38/3f/9f/fd/4d/4f/ab/DM00068254.pdf/files/DM00068254.pdf/jcr:content/translations/en.DM00068254.pdf. Consultado em Setembro 2016.
- [59] M.A. Yasin “Development of Triple Band Planar Inverted F-Antenna (PIFA) for GSM 800 MHz, DCS 1800 MHz and Bluetooth 2400 MHz”, Dissertação de mestrado, FKEE, UTHM, Parit Raja, MY, 2015
- [60] Radiation Patterns Online em <http://electriciantraining.tpub.com/14182/css/Radiation-Patterns-185.htm>. Consultado em Setembro 2016.
- [61] Aperture Antennas Online em <http://data.eefocus.com/myspace/0/942/bbs/1174163529/a7c74d4.pdf>. Consultado em Setembro 2016.
- [62] T. A. Milligan, *Modern Antenna Design*. Hoboken, USA: Wiley, 2005
- [63] Microwave Antennas Online em <https://inhinyerotm.wordpress.com/page/2/>. Consultado em Setembro 2016.
- [64] Slotted Waveguide Antennas Online em <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/slottedWaveguide.php>. Consultado em Setembro 2016.
- [65] Antenna Design Calculators Online em <http://dry-spire-3470.herokuapp.com/>. Consultado em Setembro 2016.
- [66] I. Singh e V.S. Tripathi, “Micro strip Patch Antenna and its Applications: a Survey”, vol. 2, no. 5, pp. 1595– 1599, 2011.
- [67] A. Daliri et al., “Quality Factor Effect on the Wireless Range of Microstrip Patch Antenna Strain Sensors”, vol. 14, no. 1, pp. 595– 605, 2014.
- [68] I. Ahmed, S. Arefin, S. Hussain e Z. Shames, “Performance Study of Microstrip patch Antenna for GPS Communication System”, vol. 4, no. 7, pp. 2030– 2032, 2013.
- [69] RF & Microwave Antennas Online em <http://amitec.co/home/antenna-positioner-transmission-line/rf-microwave-antenna>. Consultado em Setembro 2016.
- [70] Chapter 6: Reflector Antennas Online em http://www.academia.edu/3647562/the_satellie_componets. Consultado em Setembro 2016.

- [71] The Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Radio Telescope (FAST) Project Online em <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1105/1105.3794.pdf>. Consultado em Setembro 2016.
- [72] China completes world's largest radio telescope Online em <http://phys.org/news/2016-07-china-world-largest-radio-telescope.html>. Consultado em Setembro 2016.
- [73] "Printed Circuit Board RFID Devices: LXMS Series", MAGICSTRAP Application Note. Online em http://www.mouser.com/pdfdocs/magicstrap_application_guide.PDF. Consultado em Setembro 2016.
- [74] ALR-8800 Enterprise RFID Reader Online em <https://www-304.ibm.com/partnerworld/gsd/showimage.do?id=19303>. Consultado em Setembro 2016.
- [75] Atelier Online em http://www.av.it.pt/medidas/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=60. Consultado em Setembro 2016.
- [76] Materiais dielétricos para microondas e técnicas de fabricação Online em http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/17115/17115_3.PDF. Consultado em Setembro 2016.

